

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**FAKULTA STROJNÍ**

**Ústav automobilů, spalovacích  
motorů a kolejových vozidel**

**Přípravek pro měření tumblu ve válci spalovacího motoru**

**Device for in-cylinder tumble measurement**

**Diplomová práce**

**Jiří Schmidt**



Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Dopravní, letadlová a transportní technika

Vedoucí práce: Ing. Petr Hatschbach CSc.

---

**Praha 2018**



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Schmidt** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **397238**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Zařízení pro měření tumbly ve válci spalovacího motoru**

Název diplomové práce anglicky:

**Device for in-cylinder tumble measurement**

Pokyny pro vypracování:

Proveďte rešerši způsobů měření a vyhodnocování vírového útvaru s příčnou osou rotace (tumble) ve válci spalovacího motoru při stacionární zkoušce na aerodynamické trati. Proveďte konstrukční návrh měřicího zařízení s elektrickým výstupem měřené úrovně tumbly a po vyrobení jednotlivých dílů měnič zkompletujte. Vypracujte postup vyhodnocení měření. Vytvořte jednoduchou měřicí aplikaci v prostředí LabView pro zaznamenání dat a měřených hodnot při použití měřiče tumbly. Proveďte ověřovací měření s hlavou válců motoru EA211.

Seznam doporučené literatury:

databáze SAE Papers  
HATSCHBACH P. Měření rychlostního pole ve válci spalovacího motoru pomocí integrálních metod a laserové dopplerovské anemometrie, Disertační práce, ČVUT v Praze, fakulta strojní, 1995

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Petr Hatschbach, CSc., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.10.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2018**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Petr Hatschbach, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vitek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá měřením vírového útvaru s příčnou osou rotace (tumble) při stacionární zkoušce na aerodynamické trati. Součástí je rešerše používaných způsobů měření, ze kterých je vybrán princip použitý ke konstrukci měřicího zařízení pro laboratoře ČVUT. Pro obsluhu měření je vytvořena aplikace v programu LabView. Pro vyhodnocení je vytvořen dokument v programu Microsoft Excel, ve kterém jsou naprogramovány rovnice obsažené v této práci.

## Anotation:

The diploma thesis deals with the measurement of whirl structure with transverse axis of rotation (tumble) during a stationary test on aerodynamic track. A part of it is a survey of the measurement methods used, from which the principle used for the construction of the measuring equipment for ČVUT laboratories is chosen. To handle the measurement an application in program LabView is made. For processing a document in program Microsoft Excel is made, in which the equations contained in this work are programmed.

## Klíčová slova:

Tumble, měření tumblu, LabView, Excel, stacionární zkouška, hlava motoru

## Keywords:

Tumble, measurement of tumble, LabView, Excel, stationary test, engine head



## Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá měřením tumblu ve válci při stacionární zkoušce na aerodynamické trati. Tumble je vírový útvar, který může vznikat ve válci spalovacího motoru v průběhu sání. Jeho osa je kolmá na osu válce. Práce definuje vírové číslo tumblu, které měřenou vírovou strukturu kvantifikuje. V první části práce je zpracovaná rešerše možností měření tumblu, ze které je vybrán princip měření. Pro zvolený princip měření je navrženo zařízení použité v laboratořích ČVUT v Dejvicích. Pro měřicí zařízení je vytvořen 3D model v programu Creo. Dále je vytvořena výkresová dokumentace, která je přiložena k této práci. Práce dále pojednává o možných problémech při sestavení a na co si dát pozor při montáži, pokud mají být výsledky měření přesné.

K zaznamenání měření jsou použity snímače tlaku, teploty a krouticího momentu, jejichž zapojení a následná kalibrace je také součástí práce. Výstupní hodnoty ze snímačů jsou zpracovávány v aplikaci vytvořené v programu LabView. O obsluze této aplikace práce také pojednává.

Pro vyhodnocení měření je vytvořen dokument v programu Microsoft Excel. O obsluze dokumentu pojednává jedna kapitola této práce. Dále jsou popsány výpočty, na kterých stojí teorie použitá k měření a rovnice naprogramované ve vytvořeném dokumentu.

Poslední část práce se věnuje výsledkům měření. Funkčnost celého zařízení byla demonstrována měřením na hlavách motorů EA211 a Škoda 1,6 MPI. Výstupem těchto měření jsou grafy znázorňující průběh vírového čísla tumblu v závislosti na zdvihu ventilu.



## Abstrakt:

The diploma thesis deals with the measurement of the tumble in the cylinder during the stationary test on the aerodynamic track. Tumble is a whirl that can arise in the cylinder of the combustion engine during suction. Its axis is perpendicular to the axis of the cylinder. The work defines the whirl number of the tumble that quantifies the measured whirl structure. In the first part of the thesis there is processed the search of the tumble measurement, from which the measurement principle is chosen. For the chosen measurement principle, the equipment used in the CTU laboratories in Dejvice is designed. A 3D model in the Creo program is created for the measuring device. In addition, the drawing documentation is created, which is attached to this work. The work also discusses possible assembly problems and what to look out for, when the measurements are to be accurate.

Pressure, temperature and torque sensors are used to record the measurement, whose connection and subsequent calibration is also part of the thesis. Output values from sensors are processed in an application created in LabView. It also deals with handling this application.

A document is created in Microsoft Excel to evaluate the measurement. One chapter of this paper deals with the handling of the document. Next, the calculations on which, the theory used for the measurement and the equation programmed in the created document are described.

The last part of the thesis deals with the measurement results. The functionality of the whole device was demonstrated by measuring the EA211 and Škoda 1.6 MPI engine heads. The outputs of these measurements are graphs illustrating the course of the vortex stroke in dependence on the valve stroke.



## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Hatschbacha CSc. a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu použité literatury.

V Praze dne .....

Jiří Schmidt .....



## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Hatschbachovi CSc., za cenné připomínky a metodické vedení. Dále bych rád poděkoval Ing. Miloslavu Emrichovi Ph.D. za odborné konzultace. V neposlední řadě bych rád poděkoval rodině za podporu při studiu.



## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>- 7 -</b>
<b>2</b>	<b>REŠERŠE ZPŮSOBŮ MĚŘENÍ TUMBLU A JEHO VYHODNOCENÍ .....</b>	<b>- 9 -</b>
2.1	INTEGRÁLNÍ METODY MĚŘENÍ.....	- 9 -
2.2	PIV (PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY).....	- 11 -
2.3	LDA (LASER DOPPLER ANEMOMETRY) .....	- 16 -
2.4	VRTULKA.....	- 16 -
2.5	3 SILOVÉ SNÍMAČE .....	- 17 -
2.6	PŘEVEDENÍ NA SWIRL .....	- 18 -
2.7	ODPOROVÝ MĚŘIČ PŘÍČNÉ ROTACE .....	- 19 -
2.8	ZÁVĚR REŠERŠNÍ ČÁSTI .....	- 20 -
2.9	SCHÉMA A POPIS MĚŘÍČÍHO STANOVISTĚ.....	- 20 -
<b>3</b>	<b>KONSTRUKČNÍ ČÁST .....</b>	<b>- 22 -</b>
3.1	3D MODEL STANOVISTĚ .....	- 22 -
3.2	HLAVNÍ VÁLEC.....	- 25 -
<b>4</b>	<b>SESTAVENÍ.....</b>	<b>- 26 -</b>
4.1	KROK 0.....	- 26 -
4.2	KROK 1 – VLOŽENÍ SÍTKY .....	- 26 -
4.3	KROK 2 – MONTÁŽ POUZDER .....	- 27 -
4.4	KROK 3 – NAsAZENÍ SNÍMAČE .....	- 28 -
4.5	KROK 4 – VLOŽENÍ VLOŽEK.....	- 29 -
4.6	KROK 5 – MONTÁŽ OSIČKY.....	- 30 -
4.7	KROK 6 – ZAJIŠTĚNÍ PROTI PŘETÍŽENÍ .....	- 30 -
<b>5</b>	<b>MĚŘÍČÍ APLIKACE .....</b>	<b>- 31 -</b>
5.1	ZAPOJENÍ SNÍMAČŮ .....	- 31 -
5.2	LABVIEW .....	- 32 -
5.3	MĚŘÍČÍ APLIKACE .....	- 32 -
5.4	KALIBRACE .....	- 34 -
<b>6</b>	<b>ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ .....</b>	<b>- 35 -</b>
6.1	TEORIE K VÝPOČTŮM .....	- 35 -





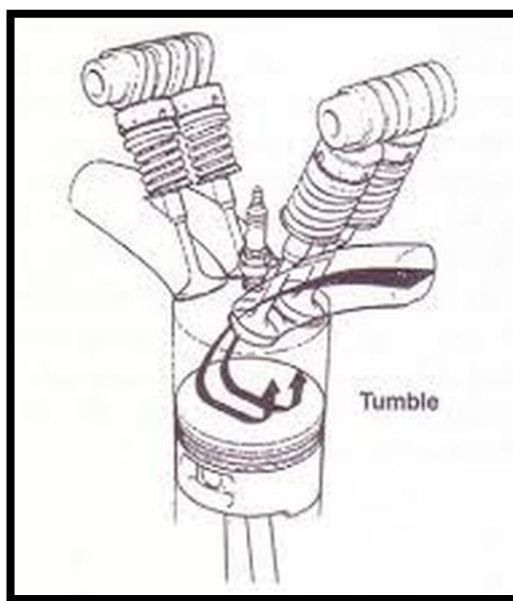
6.1.1	Stanovení součinitele odporu .....	- 37 -
6.1.2	Hmotnostní tok podle ČSN ISO 5167 .....	- 40 -
6.1.3	Kinematická viskozita .....	- 41 -
6.2	VYHODNOCOVACÍ EXCEL .....	- 43 -
<b>7</b>	<b>VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ .....</b>	<b>- 46 -</b>
7.1	EA211 – OBA VENTILY .....	- 46 -
7.2	EA211 – PRAVÝ VENTIL .....	- 48 -
7.3	ŠKODA 1,6 MPI – OBA VENTILY, OTEVŘENÁ KLAPKA .....	- 50 -
7.4	ŠKODA 1,6 MPI – OBA VENTILY, ZAVŘENÁ KLAPKA .....	- 52 -
7.5	ŠKODA 1,6 MPI – PRAVÝ VENTIL, OTEVŘENÁ KLAPKA .....	- 54 -
7.6	ŠKODA 1,6 MPI – PRAVÝ VENTIL, ZAVŘENÁ KLAPKA .....	- 55 -
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>- 56 -</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....</b>	<b>- 57 -</b>
<b>10</b>	<b>POUŽITÉ ZDROJE .....</b>	<b>- 59 -</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>- 61 -</b>
<b>12</b>	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>- 64 -</b>

# 1 Úvod

Automobily poháněné spalovacími motory jsou tu s námi již řadu let, a i když se stále častěji objevují vozidla poháněná čistě elektromotorem, v blízké budoucnosti zůstane srdcem automobilu spalovací motor. Abychom byli schopni splnit stále náročnější požadavky na ekologii a ekonomii provozu automobilu, je nutné zaměřit se na vlastní děje v motoru. Znalost proudění vzduchu ve válci motoru je klíčová, ovlivňuje totiž tvorbu směsi a její následné spalování. Na proudění vzduchu ve válci je zaměřena i tato práce.

V průběhu sání mohou vznikat ve spalovacím prostoru dvě velké vírové struktury. Tumble a swirl. Rozhodující pro to, která vírová struktura nakonec ve válci vznikne, je tvar sacího kanálu, sedla ventilu a spalovacího prostoru v hlavě.

Tumble je vír, jehož osa je kolmá na osu válce. Pro dosažení tumblu u čtyřventilových hlav je ideální symetrie sacích kanálů podle roviny v které se pohybuje ojnice. Tumble ve čtyřventilové hlavě je znázorněn na obrázku 1 z [autoelexblog.blogspot.cz](http://autoelexblog.blogspot.cz) [1]



Obrázek 1: Tumble [1]

Druhou velkou vírovou skupinou, vznikající v motoru během sání je swirl, znázorněn na obrázku 2 od společnosti Nissan Motor Corporation [2]. Swirl je vír, jehož osa je totožná s osou válce. Dosažení swirlu, neboli víru s tečnou rotací u čtyřventilových hlav je vzhledem k zástavbovým možnostem složitější. Proto se používá zpravidla jeden šroubový kanál, který sice má vyšší ztráty, ale umožňuje lepší zavíření náplně.



Obrázek 2: Swirl [2]

Cílem této práce je provést rešerši možností měření tumblu. Z této rešerše vybrat způsob, který se použije k vylepšení současných možností měření této vírové struktury v motorových laboratořích ČVUT v Dejvicích. Pro zvolený princip navrhnout konstrukční řešení a vypracovat pro něj výrobní dokumentaci. Po následné montáži, zapojení snímačů a tvorby měřicí aplikace bude provedeno měření na hlavách motorů EA211 a Škoda 1,6 MPI, které demonstruje funkčnost navrženého zařízení. Naměřená data se následně zpracují a vyhodnotí. Cílem měření je kvantifikovat úroveň víru tumble vzniklého v průběhu sání.

## 2 Rešerše způsobů měření tumblu a jeho vyhodnocení

Možnosti měření tumblu lze rozdělit na dvě skupiny. Jednak na přímé měření, kdy měříme pohyb částic v proudu a z nich vyhodnocujeme vlastnosti víru. Druhou skupinou jsou integrální metody měření, které jsou založeny na zachytávání silového působení víru na kontrolní těleso.

### 2.1 Integrální metody měření

Jedná se o metody, které měří silové působení vírové struktury ve zkoumané oblasti. Tato oblast může být rovinná, nebo objemová v závislosti na zvolené metodě. Elementární vírové účinky se poté zintegrují přes celou měřenou oblast. Pro zachycení účinku vírové struktury lze použít sítku, vrtulku, nebo například voštinu, která se vloží do válce a ke které se připojí snímač. Měřenou veličinou jsou otáčky, moment, síla, deformace, atd. v závislosti na použitém tělese. Podle měřicího prvku můžeme metody rozdělit na lopatkové přípravky (rotující lopatky v proudu), impulzní (pevná voština zachytává celkový moment) a odporové (sítka v proudu náplně válce). Tato měření probíhají pouze na válci, který neobsahuje píst. Vzniklé proudění proto nikdy nemůže zcela odpovídat proudění v celém pracovním rozsahu motoru. Nicméně svou vypovídající hodnotu má a lze jej použít pro porovnání různých hlav, potažmo jejich sacích kanálů. Měření lze také použít k validaci výpočtového modelu.

Abychom mohli kvantifikovat úroveň tumblu zavádíme bezrozměrné vírové číslo tumblu (Tumble ratio), které lze definovat jako podíl fiktivních otáček  $n_{jp}$  a otáček motoru  $n$ .

$$TR = \frac{n_{jp}}{n} \quad (2.1)$$

$n$	.....	otáčky motoru
$n_{jp}$	.....	otáčky fiktivního tuhého tělesa
$TR$	.....	vírové číslo tumblu

Otáčky, i když se motor netočí a je profukovaná pouze hlava, lze spočítat z geometrie a měřeného objemového toku. Objemový tok, který proteče při měření ventily, odpovídá objemovému toku nasávaného vzduchu při hledaných otáčkách. Pístová rychlost  $c_{pist}$  se spočítá z rovnice (6.15). Výsledné otáčky poté podle rovnice (2.2).

$$n = \frac{c_{pist}}{2 \cdot Z} \quad (2.2)$$

$c_{pist}$	.....	pístová rychlost
$n$	.....	otáčky motoru
$Z$	.....	zdvih

Fiktivní otáčky  $n_{jp}$  se spočítají z rovnice (2.3), přičemž  $q_V$  je objemový tok spočítaný z rovnice (6.16) a  $\rho$  je hustota počítaná podle rovnice (6.21)

$$n_{jp} = \frac{\dot{B}_T}{q_V \cdot \rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}} \quad (2.3)$$

$\dot{B}_T$	.....	tok momentu hybnosti
$D$	.....	vrtání válce
$n_{jp}$	.....	otáčky fiktivního tuhého tělesa
$q_V$	.....	objemový tok
$\rho$	.....	hustota vzduchu

$\dot{B}_T$  jakožto tok momentu hybnosti je veličina charakterizující proudění a je jedním z možných výstupů integrálních metod. Její výpočet bude vysvětlen v kapitole 6.1 *Teorie k výpočtům*.

Aby bylo možné porovnávat hodnoty vírových čísel tumblu napříč různými motory, je nutné je redukovat podle rozměrů motoru, čím dostaneme číslo na těchto parametrech nezávislé. Důležité je to hlavně u zdvihu, kdy pro jednu hlavu dostaneme jedno proudové pole, ale může být použita na motorech s různým zdvihem.

$$TR_r = \frac{TR \cdot D}{Z} \quad (2.4)$$

$D$	.....	vrtání
$TR$	.....	vírové číslo tumblu
$TR_r$	.....	redukováné vírové číslo tumblu
$Z$	.....	zdvih

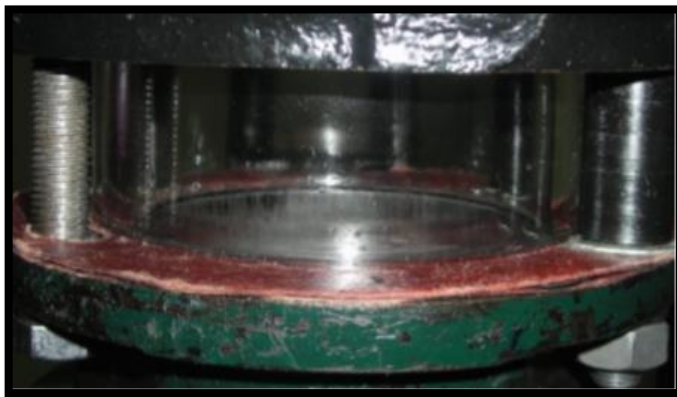
Pro přímé měření lze využít metody založené na PIV, LDA, nebo jiné optické metody. Za integrální metody lze zmínit metody používající vrtulku umístěnou v proudu, 3 silové snímače, převedení na swirl a měření voštinovým kotoučem, či síťku umístěnou v proudu.

## 2.2 PIV (Particle Image Velocimetry)

Metoda pro kvantitativní měření okamžitých rychlostí. K zmapování rychlostního pole se používá vysokofrekvenční kamera a laser. Laserový paprsek se rozprostře do roviny, ve které chceme provést měření. Nejčastěji je provedeno dva a více pulzů laseru ve velmi krátkém časovém rozmezí (zlomky sekund). Pro každý pulz je kamerou zachycena měřená oblast. Měření se vyhodnocuje právě z těchto dvojic snímků. Aby bylo možné pozorovat proudění, jsou do nasávaného vzduchu přimíchávány částice. Přimíchávané částice mají rozměry v řádu micrometrů.

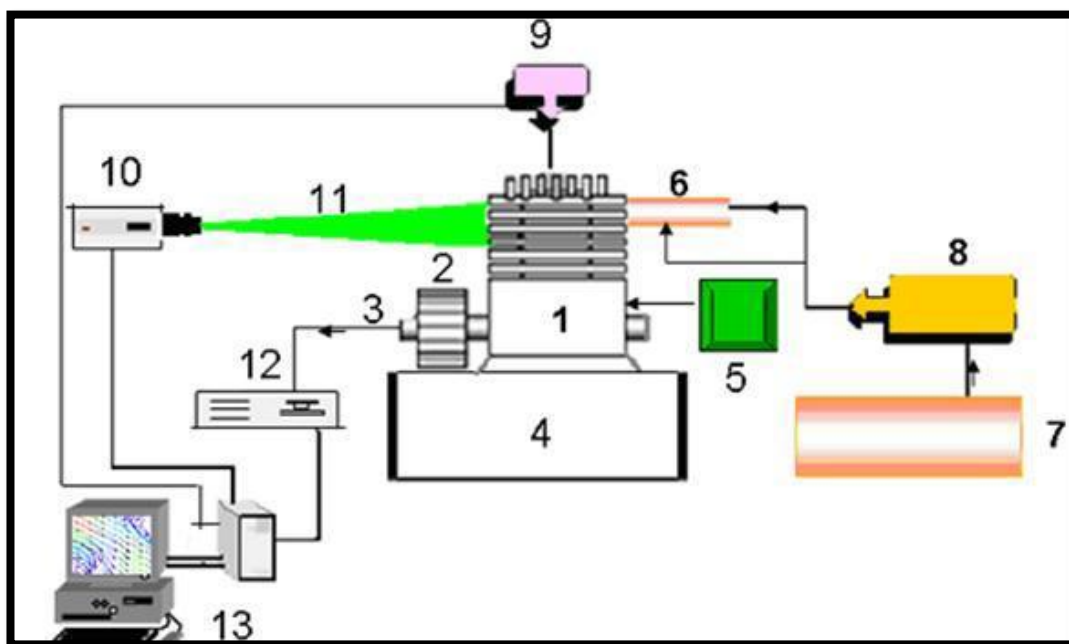
Příklad uspořádání měření metodou PIV uvedeného v publikaci Journal of Applied Fluid Mechanics je na obrázku 4 [3]. Použit je jednoválcový vertikálně usazený motor s dvěma vačkami. Motor je chlazený vzduchem. V motoru nedochází ke spalování a je pouze protáčen připojeným indukčním motorem o výkonu 5 koní. Tento elektromotor je řízen na požadované otáčky. Maximální otáčky jsou 1500 ot/min. Aby bylo možné proudění vůbec pozorovat, byl válec

nastaven průhledným válcem z plexiskla vysokým 35mm (Obrázek 3). Aby byl zachován kompresní poměr 10:1 byl píst o 35mm nastaven.



Obrázek 3: Nastavení válce plexisklem [3]

Použit je dvojitý pulzní laser ND-YAG s 200 mJ na pulz energie při vlnové délce 532 nm. Šířka laserové vrstvy je 0,5 mm. Pro zachycení osvětleného prostoru je použita CCD kamera s rozlišením 2048 na 2048 pixelů a záznamem 14 snímků za sekundu. Celý experiment je ovládán a řízen z Pc. Aby bylo možné proud vzduchu pozorovat, jsou do něj přimíchávány mikroskopické částice Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat ( $C_{26}H_{50}O_4$ ).



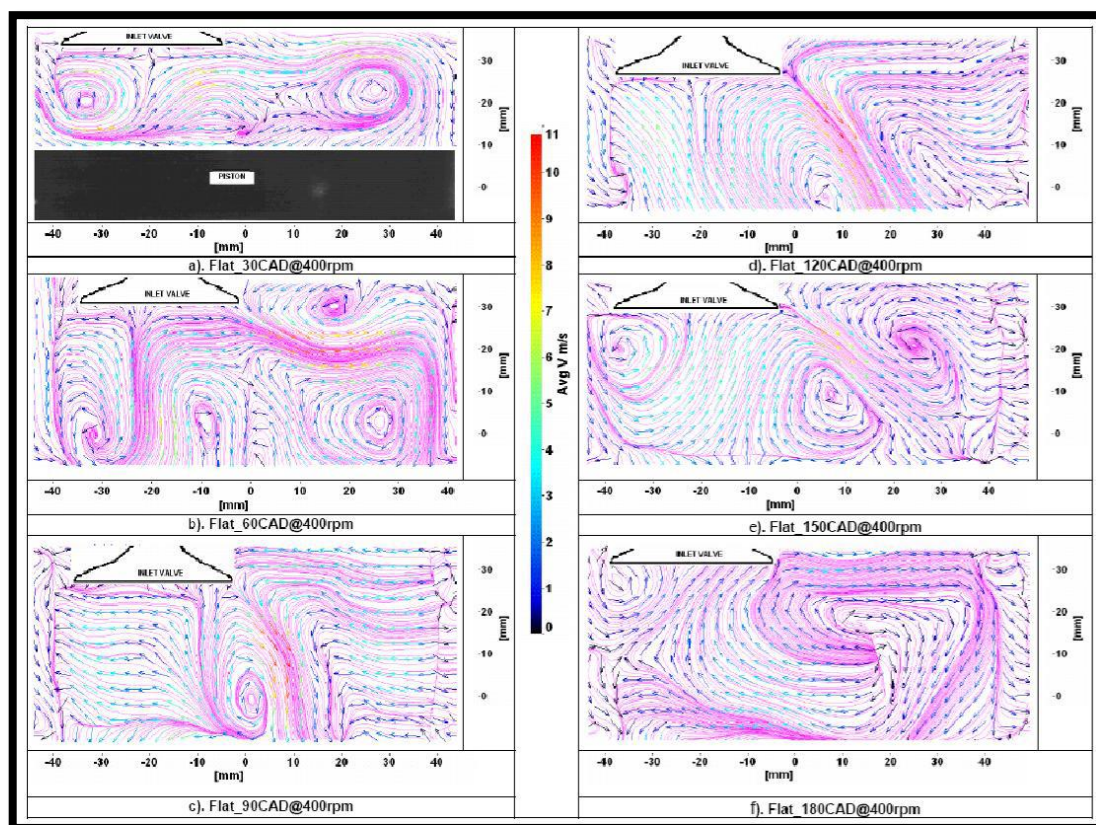
Obrázek 4: Schéma měření pro PIV metodu [3]

1- Zkoušený motor, 2- Hnací elektromotor, 3- Snímač natočení klikového hřídele, 4- Zkušební stanoviště, 5- Ovladač rychlosti, 6- Sací plénium, 7- Kompresor, 8- Přidavač částic, 9- Kamera, 10- Laser, 11- Laserová rovina, 12- Modulátor signálu, 13- Záznamový systém



Částice prolétávající osvětlenou rovinou jsou vyfoceny kamerou a následně na další pulz laseru je pořízen další snímek. Takto vznikne dvojice snímků, které se následně zpracovávají a ze kterých se počítá rychlostní pole. Vedle záznamu z kamery se do počítače ukládají informace o poloze klikového hřídele.

Následně se snímky zpracují speciálním programem, který měřenou oblast rozdělí na několik menších oblastí a v nich vyhodnotí vektor rychlosti. Ten je poté znázorněn šipkou. Rychlostní pole je vidět na obrázku 5. Sada snímků je zpracována pro jedny otáčky. Mění se poloha klikového hřídele. Ze snímků je patrné, kudy proudí vzduch nejrychleji a jaké vírové struktury v prostoru vznikají.



Obrázek 5: Rychlostní pole [3]



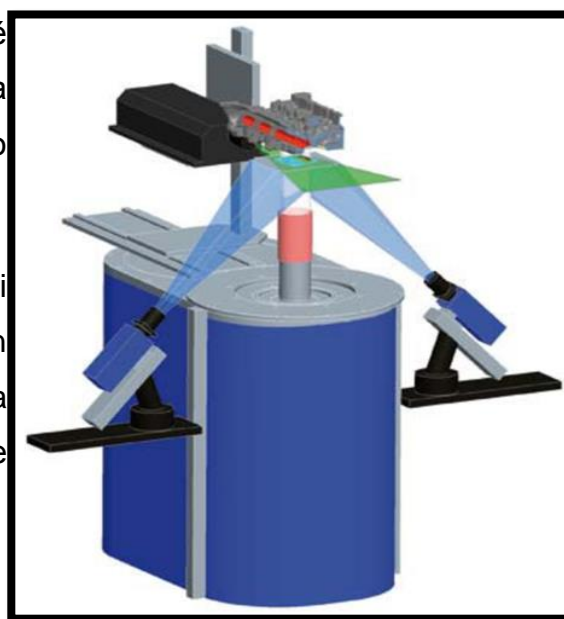
Autoři následně definují bezrozměrné vírové číslo tumblu přes vířivost (2.5). Tento přístup je odlišný od přístupu použitého v kapitole 2.1 *Integrální metody měření*, kde je počítáno s momentem hybnosti náplně. Výpočet přes vířivost dává v tomto případě smysl, jelikož jak můžeme vidět na obrázku 5 vlevo nahoře pro 30° natočení kliky, vznikají dva víry. Promísení je relativně velké, ale integrální metoda by nám dala jako výsledek podstatně nižší číslo, jelikož jeden vír by kompenzoval účinek toho druhého.

$$TR_{PIV} = \frac{\sum_{i=1}^k \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)}{2 \cdot k \cdot \omega} \quad (2.5)$$

$i$	.....	pořadové číslo
$TR_{PIV}$	.....	číslo tumblu z PIV
$u$	.....	x-ová složka vektoru rychlosti
$v$	.....	y-ová složka vektoru rychlosti
$k$	.....	celkový počet měřených oblastí
$x$	.....	souřadnice
$y$	.....	souřadnice
$\omega$	.....	úhlová rychlost klikového hřídele

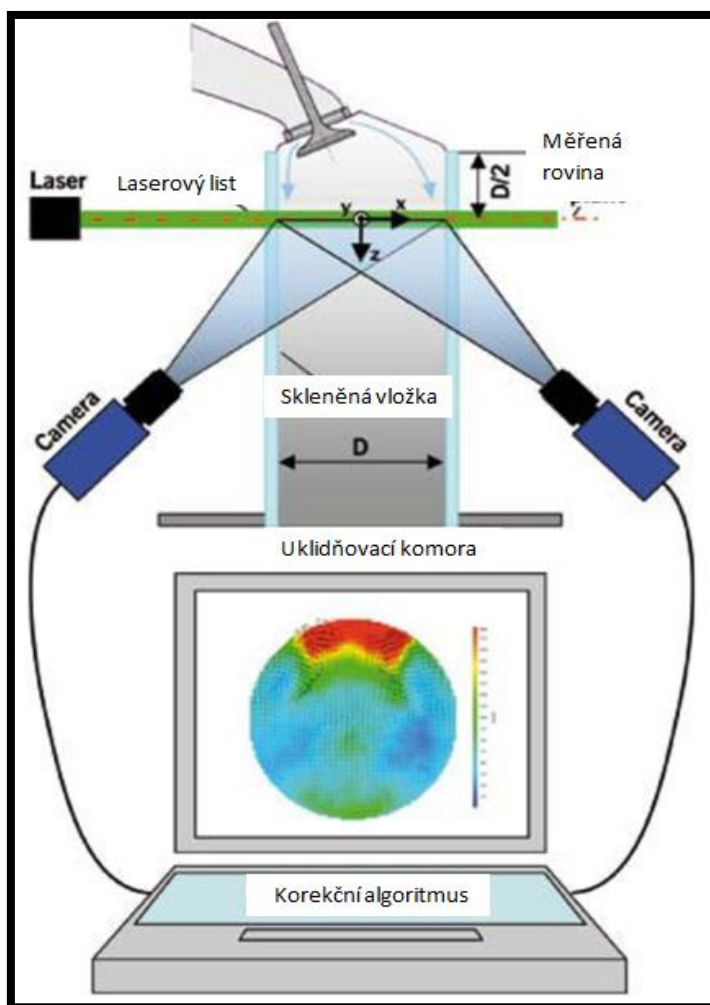
Tato metoda nám dává velmi dobrou představu o proudění vzduchu v měřené rovině. Problém je, že tato rovina zpravidla prochází osou válce. Pokud bychom ji chtěli posunout jinam, museli bychom kvůli lomu světla na válcové ploše, měření korigovat, nebo lokálně upravit válec. Výsledek měření by poté byl minimálně diskutabilní a stále v jedné rovině. Proudění jako takové je velmi chaotické a v jiné rovině může mít úplně jiný průběh a dostatečně husté zmapování by bylo časově i finančně náročné.

V AVL na to šli ve své práci Differential flow field analysis in engine development [4] jinak a použili 3D PIV. Měřící stanoviště je na obrázku 6.



Obrázek 6: PIV - AVL - měřící zařízení [4]

Měření provedli ve skleněném válci, na který byla nasazena měřená hlava. Ve válci osvětlili laserem rovinu kolmou na osu válce ve vzdálenosti poloviny vrtání od hlavy. Částice prolétávající touto rovinou byly snímány dvojicí kamer. Záznamy byly vyhodnocovány v počítači pomocí speciálního korekčního algoritmu. Výstupem měření je rychlostní pole, které lze vidět na obrázku 7.



Obrázek 7: PIV – AVL - princip měření [4]

Z rychlostního pole již lze spočítat tok momentu hybnosti podle rovnic (6.1) a (6.2). Tento přístup je analogický k integračním metodám.

## 2.3 LDA (laser Doppler anemometry)

Metoda také známá pod LDV (laser Doppler velocimetry). Svého času nejpoužívanější metoda pro měření proudu. Stejně jako PIV je neinvazivní a její použití neovlivní proudění. Její nevýhodou je znalost rychlosti pouze v jednom bodě.

## 2.4 Vrtulka

Pro zachycení účinku proudu je použita vrtulka, která se vloží do válce nasazeného pod hlavu motoru, znázorněno na obrázku 8. Snímány jsou její otáčky, z kterých se poté vyhodnocuje číslo tumblu. V práci Measurements of the Intake and In-Cylinder Flow Field to Investigate the Reliability of CFD Steady-State Simulations for Actual Engine z univerzity v Padově jej definovali ve své práci [5] rovnicí (2.6). Měření provedli na kapalinou chlazeném zážehovém čtyřdobém motoru s kompresním poměrem 11,4:1. Hlava měla 4 ventily na válec. Při měření byl přes hlavu a válec odsáván vzduch, který roztáčel vrtulku.



Obrázek 8: Vrtulka [5]

Vyvozeným tlakovým spádem 5200 Pa byly simulovány otáčky motoru 6000 ot/min odpovídající pístové rychlosti 12,7 m/s.

$$TR_V = \frac{\omega_v \cdot D}{v_{is}} \quad (2.6)$$

$TR_V$	.....	vírové číslo tumblu pro metodu s vrtulkou
$D$	.....	vrtání válce
$\omega_v$	.....	úhlová rychlost vrtulky
$v_{is}$	.....	izentropická rychlost

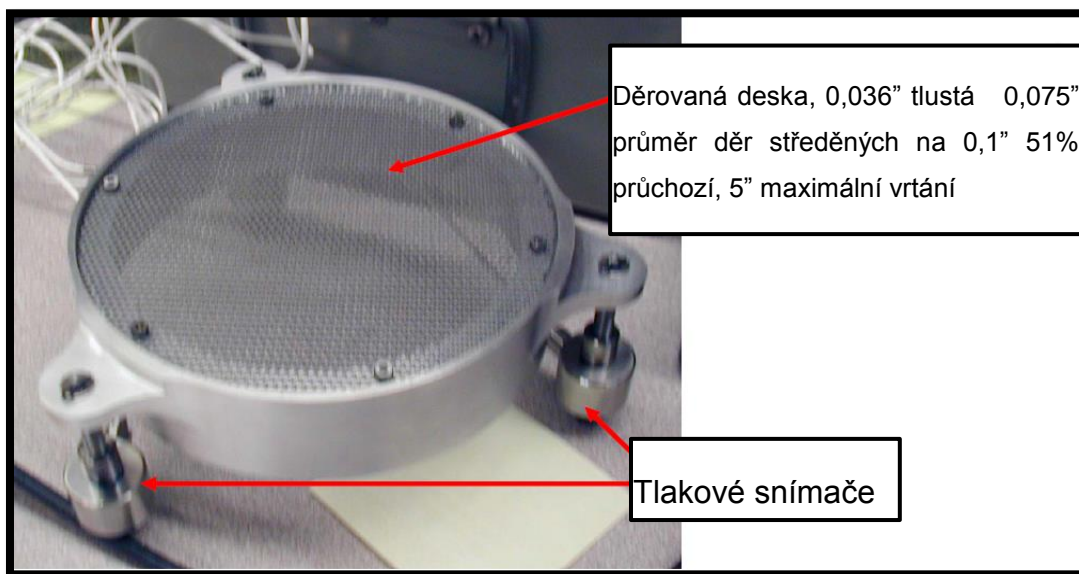
Izentropická rychlost  $v_{is}$  je definovaná výrazem

$$v_{is} = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1} p_0 \cdot \rho \left[ 1 - \left( \frac{p_c}{p_0} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} \quad (2.7)$$

$p_c$	.....	tlaková ztráta na clonce
$p_0$	.....	klidový tlak
$\kappa$	.....	Poissonova konstanta
$v_{is}$	.....	izentropická rychlost
$\rho$	.....	hustota vzduchu

## 2.5 3 silové snímače

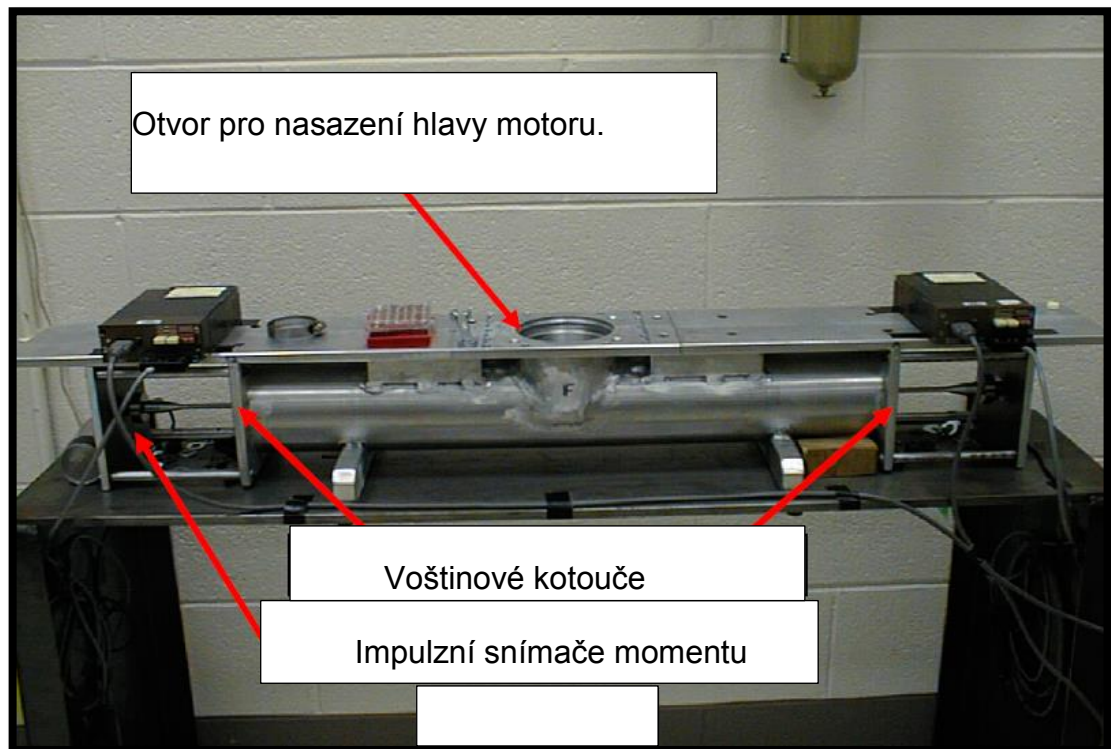
Jako odporové těleso umístěné do proudu je použita síťka, která je připevněna k přípravku, na kterém jsou umístěny silové snímače. Tyto snímače jsou umístěny po 120°, čímž definují pozici a velikost maximálního zatížení [6].



Obrázek 9: 3 silové snímače [6]

## 2.6 Převedení na swirl

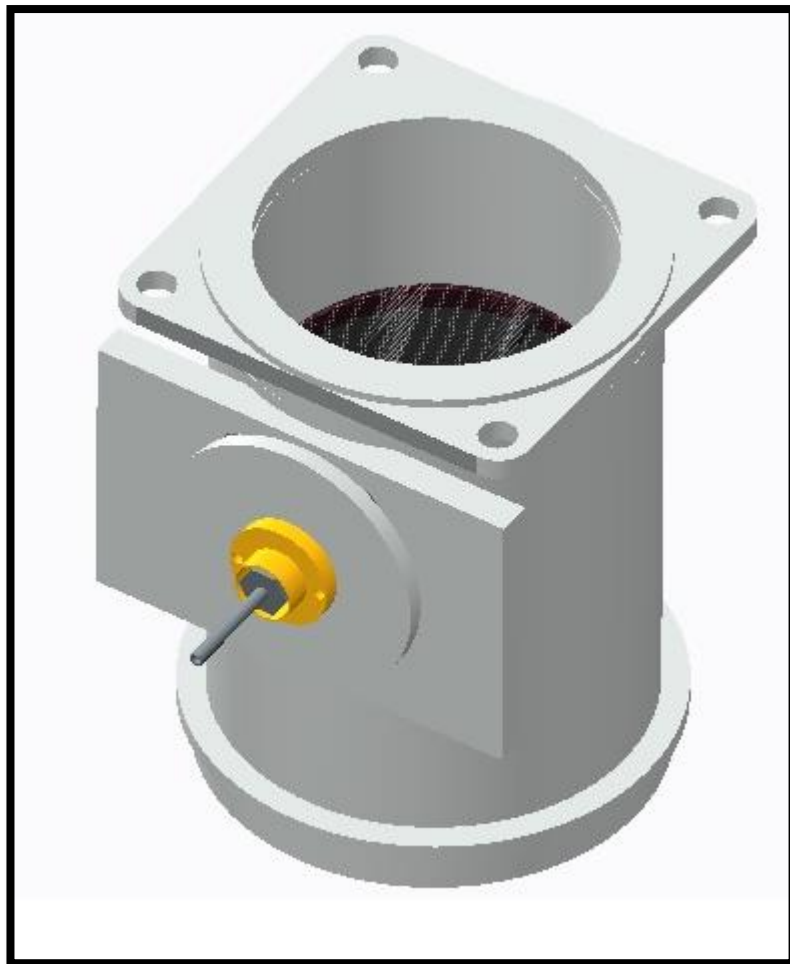
Pro měření hodnoty vírového čísla lze použít voštinový kotouč, který se vloží do válce a jehož osa je totožná s osou válce, potažmo swirlu. Měření je moment, jakým je kotouč namáhán. Pokud chceme tuto metodu použít pro měření tumblu, musíme postavit potrubí s osou kolmou na osu válce. V tomto válci poté měříme swirl, který byl původně tumblem. Je ovšem otázkou, do jaké míry je tato metoda, z důvodu nepřírozeného usměrnění víru, vhodná a jestli suma vírových čísel swirl skutečně odpovídá vírovému číslu tumble, který sací kanály v hlavě generují.



Obrázek 10: Převod na swirl [6]

## 2.7 Odporový měřič příčné rotace

Podobně, jako u tříbodového zatížení síťky i v tomto případě je jako odporový prvek použita síťka. Ing. Hatschbach v tomto případě použil přípravek na obrázku 11. Odporový měřič příčné rotace (OMPR) je sestaven z válce, ve kterém je k síťce přilepena na obruč, ke které je přidělána hřídelka. Na hřídelku je přichycena pružina. Snímá se síla v pružině, která se nastavuje, aby síťka zůstávala v horizontální poloze. Ze síly v pružině se spočítá moment, který se poté dosadí do rovnice (6.7).



Obrázek 11: OMPR - Hatschbach



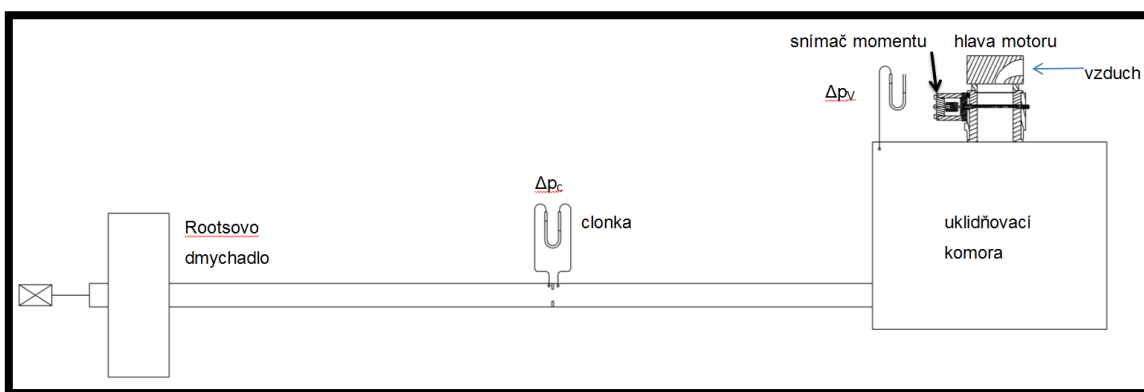
## 2.8 Závěr rešeršní části

Optické metody jsou schopny nejpřesněji popsat proudění. Lze zmapovat celý spalovací prostor avšak pro své vysoké náklady na vysokorychlostní kameru a laser, a následné složité vyhodnocovací algoritmy, které v konečné fázi stejně mohou vnést chyby do měření, jsou vhodné pro více specializovaná vědecká stanoviště, nebo soukromý sektor.

Integrální metody představují určité zjednodušení a nikdy nemůžou popsat proudění v celém prostoru válce. Dalším velkým problémem je absence pístu, který rovněž ovlivňuje proudění v motoru. Na druhou stranu jsou názorné, relativně jednoduché na zpracování a vyhodnocení.

Po analýze všech nalezených způsobů měření tumblu jsem se rozhodl pro integrální metodu založenou na zachytávání účinku proudu na síťce. Síťka bude připevněna k obruči s osičkou. K té bude připevněn snímač krouticího momentu.

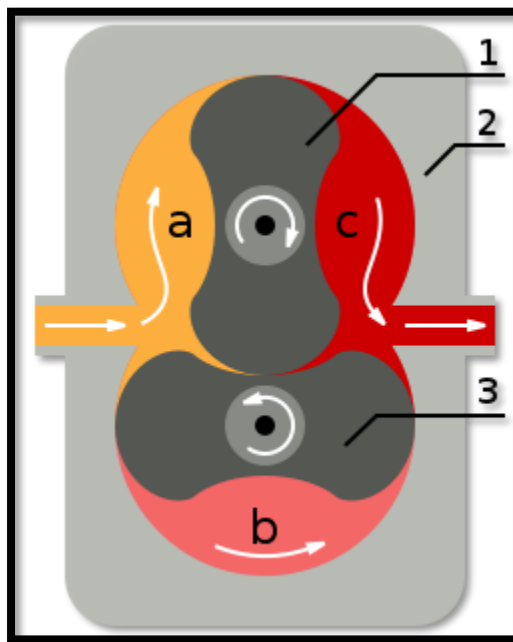
## 2.9 Schéma a popis měřicího stanoviště



Obrázek 12: schéma měřicího stanoviště

Měřicí stanoviště je znázorněno na obrázku 12. Základem měřicího stanoviště je aerodynamická trať. O proudění vzduchu se stará Rootsovo dmychadlo, jež je umístěno ve sklepních prostorách budovy. Dmychadlo pohání elektromotor a nasává vzduch z potrubí, na kterém je clonka. Na této clonce se měří tlaková ztráta, z které je počítán objemový, potažmo hmotnostní tok vzduchu. Rootsovo dmychadlo, jak je znázorněno na obrázku 13 [7], funguje na

principu přesunu vzduchu z oblasti a do oblasti c. Toho je docíleno dvojicí pístků, které do sebe zapadají. Na jedné straně dojde k nasání vzduchu, když se prostor mezi pístky začne zvětšovat. Následně je vzruch transportován přes oblast b do oblasti c, kde je vytlačen ven.



Obrázek 13: Rootsovo dmychadlo [7]

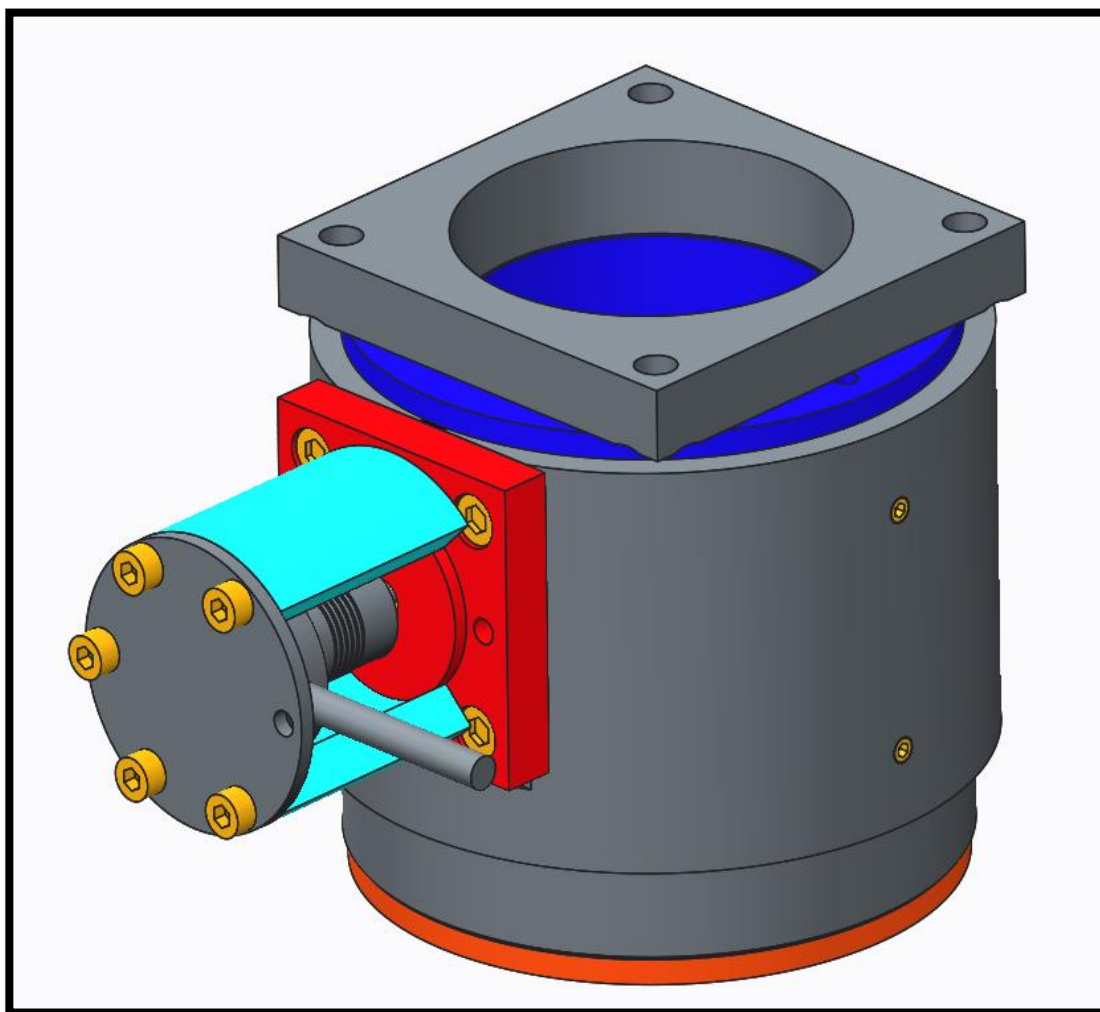
Jelikož dmychadlo by do měření víru ve válci vnášelo pulzace a mohlo by rozkmitávat síťku, je pod měřícím válcem uklidňovací komora. V této komoře je snímáný tlak, podle kterého se řídí dmychadlo. V měřícím válci je umístěna obruč se síťkou a osičkou, ke které je přichycen snímač momentu. Na válci je příruba připevněná k měřené hlavě. Vzduch je nasáván sacím kanálem, přes ventily do měřícího válce a dále do uklidňovací komory. Objem vzduchu, který proteče ventily, se nastavuje pomocí šroubů, které jsou přes přípravek přichyceny k hlavě. Těmito šrouby lze manuálně otevírat jeden, druhý, nebo oba ventily najednou. Jedna otočka šroubu odpovídá jednomu milimetru zdvihu.



## 3 Konstrukční část

### 3.1 3D model stanoviště

Tvorba modelu probíhala v programu Creo 2.

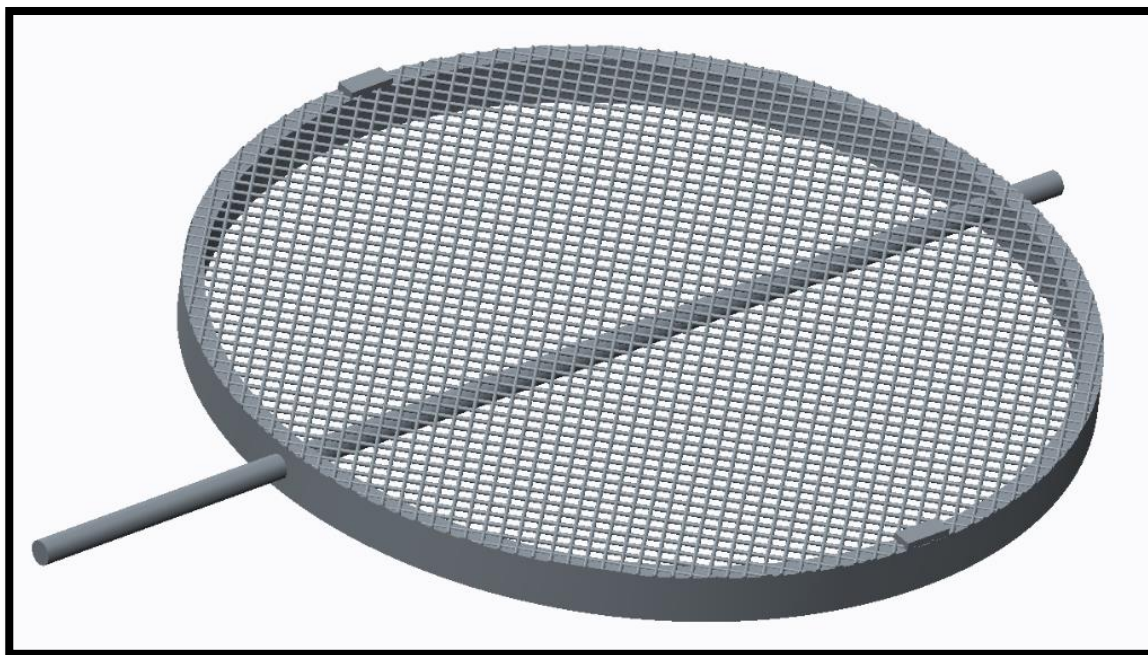


Obrázek 14: 3D model měřicího stanoviště

Model byl koncipován pro měření hlav motorů s rozsahem vrtání od 70 do 100 mm. Tento konkrétní model je navržen pro vrtání 76,5 mm. Dané vrtání bylo zvoleno kvůli budoucímu srovnání výsledků s předchozím stanovištěm, na kterém byly mimo jiné měřeny hlavy z motorů EA211 a Škoda 1.6 MPI, které mají shodně vrtání 76,5 mm. Hlavní předností tohoto modelu je nutnost výměny pouze tří dílů v případě potřeby měřit hlavu s jiným vrtáním. Mění se dvě vložky

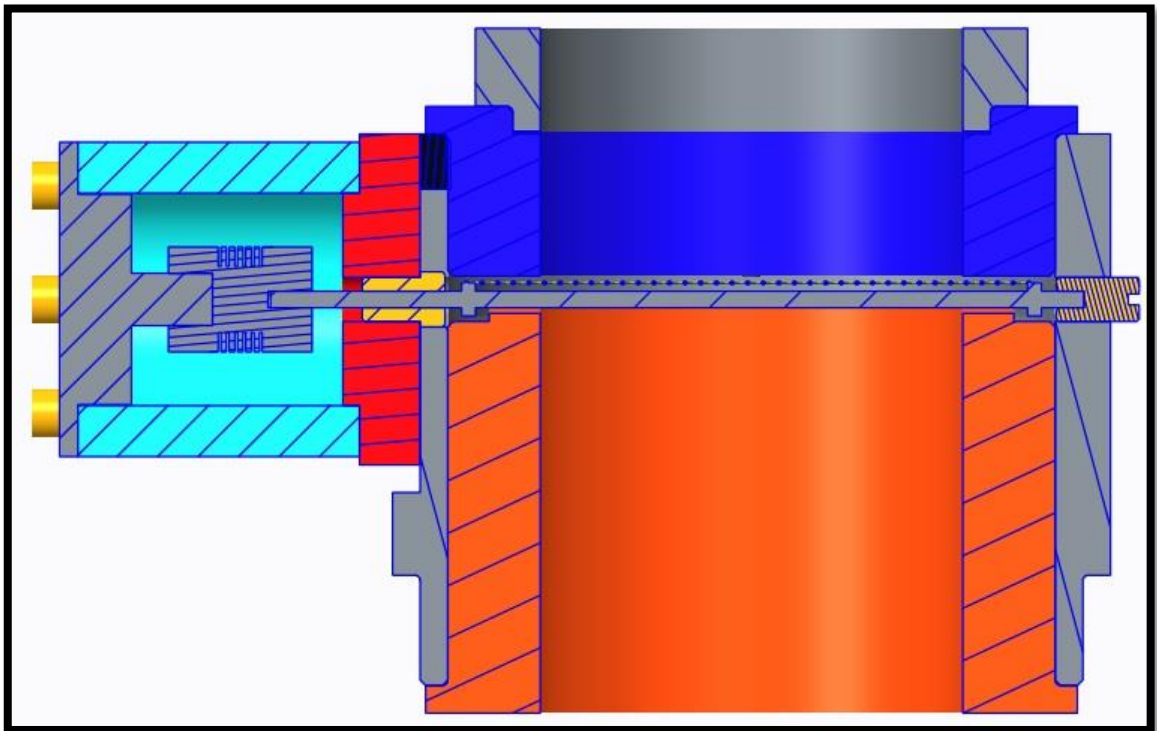
(modrá a oranžová) a šedivá příruba pro připevnění hlavy. Aby byl zachován poměr mezi vzdáleností hlavy od sítě a vrtáním, mohou být příruba a vrchní vložka vyšší, případně nižší. Jak pro 100 mm vrtání tak i pro 70 mm není problém s budoucí konstrukcí, což se při návrhu průběžně kontrolovalo.

Pro zachycení účinku proudu je použita síťka, která je přilepena na obruč s dvěma otvory pro nalisování tyčky. Po jejím nalisování a nalepení dosedacích plošek pro stavěcí šroubky je možná její zástavba do válce.



Obrázek 15: Odporové těleso

Tyčka je uložena ve dvou ložiskových pouzdrech. Na obrázku 16 vpravo vidíme ložiskový šroub, jenž je našroubován do hlavního válce. Na druhé straně je pouzdro, které je vsunuto do válce a příruby. Toto uložení zajišťuje, že snímaný výstup bude vždy pouze krouticí moment bez nežádoucího ohybového zatížení, které by při měřeních mohlo vznikat. Současně slouží jako ochrana snímače, který je určen k měření pouze krouticího momentu.



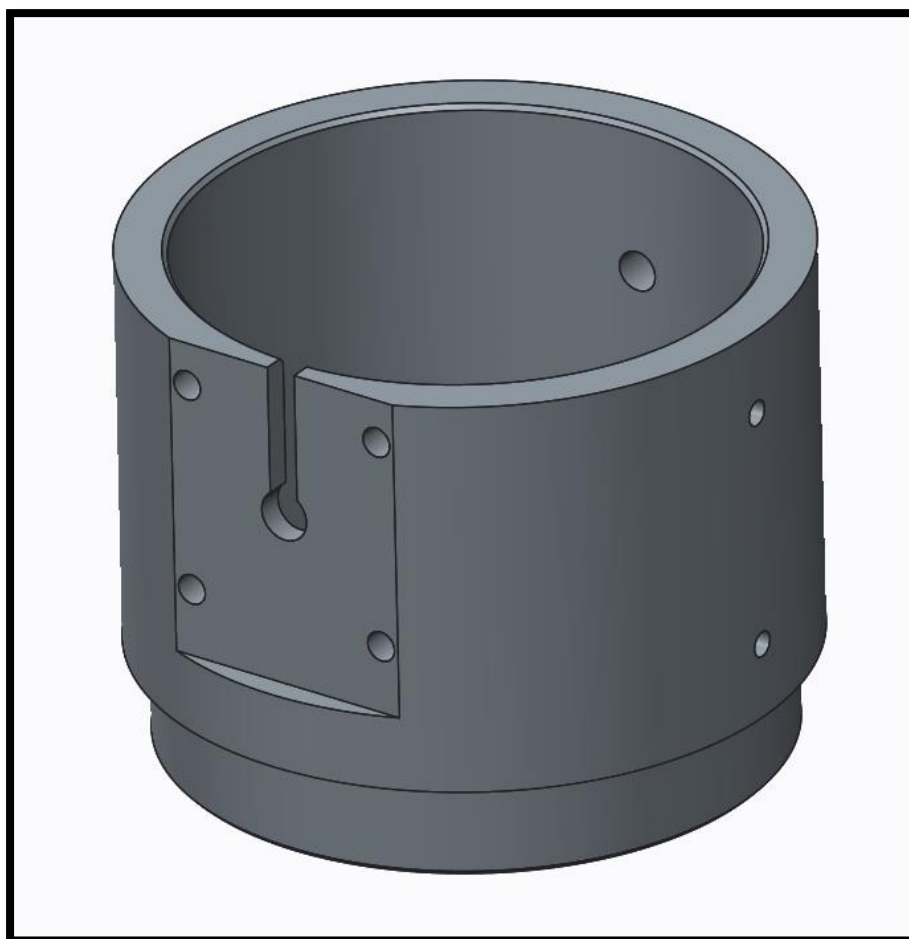
Obrázek 16: Řez osou snímače

Na obrázku 16 je také vidět spojka WK2/15-26-.3H7-3/8“H7 od společnosti Uzimex, která je mezi snímačem a tyčkou. Předností této spojky je schopnost vyrovnat drobné axiální a radiální nerovnosti. Snímač je podepřen trubkou, aby byla zajištěna souosost s otvory v přírubě potažmo hlavním válcí. Trubka má vyříznutou výseč, umožňující přístup ke šroubkům spojky. Souosost je současně zajištěna geometrickými tolerancemi na vložené trubce, přírubě a hlavním válcí, viz přiložené výkresy.

Těsnost válce, ve kterém proudí vzduch z hlavy do uklidňovací komory, je zajištěna na jedné straně ložiskovým šroubem a na straně druhé ložiskovým pouzdrem a utěsněním v drážce pro vložení sítky. Tím je zajištěno, že nedochází k přisávání vzduchu jinudy, než přes sací ventily.

## 3.2 Hlavní válec

Hlavní válec jakožto nejsložitější díl celé sestavy musí splňovat mnoho požadavků. Otvory pro ložiska musí být souosé, závitové díry pro přichycení příruby musí být tolerovány k ose ložisek. Současně je tolerována dosedací plocha příruby, aby byla zajištěna souosost všech potřebných dílů. Ve válci je vyříznutá drážka umožňující vložení tyčky se sítkou. Spodní vnější průměr válce byl zvolen podle možností stávající aerodynamické trati, aby pasoval do příruby na uklidňovací komoře.

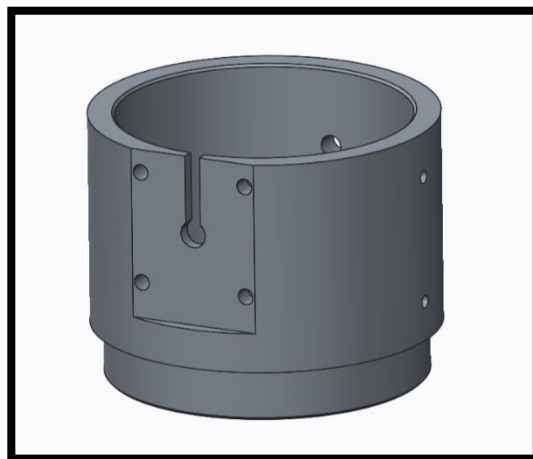


Obrázek 17: hlavní válec

## 4 Sestavení

### 4.1 Krok 0

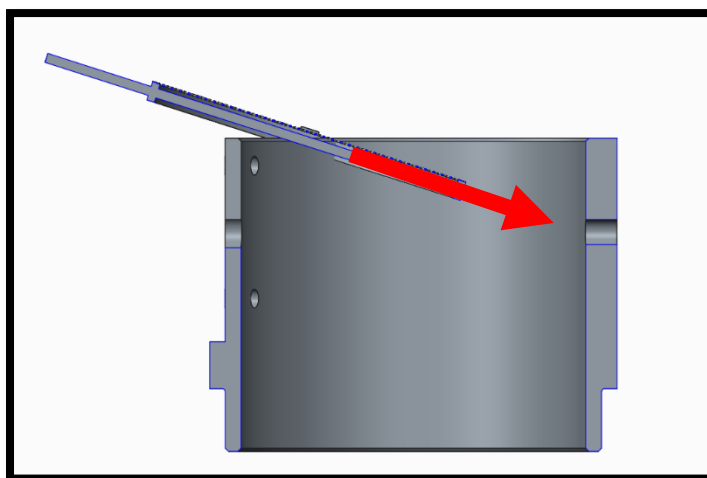
Vezměme hlavní válec a očistíme jej od nečistot, které by mohly způsobit špatné dosednutí dílů a případné nesouososti. Pro snadnější montáž a budoucí výměnu vložek můžeme namazat vnitřní stěnu válce.



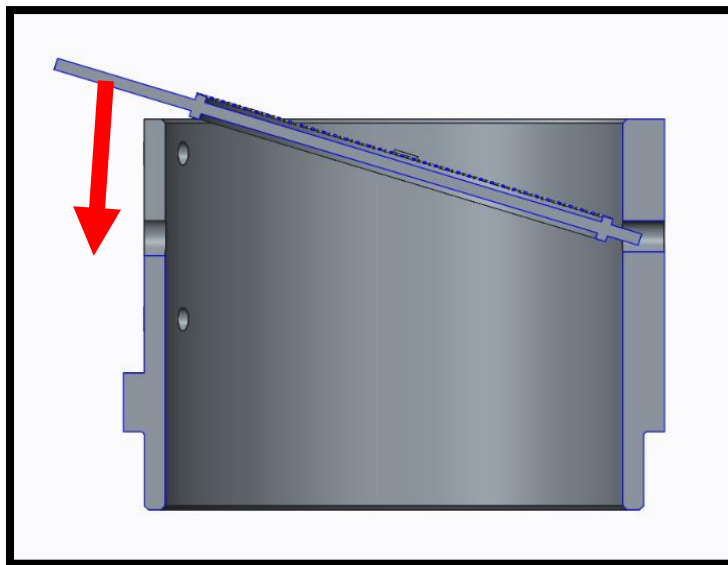
Obrázek 18: hlavní válec 2

### 4.2 Krok 1 – vložení sít'ky

Podle obrázků 19 a 20 vložíme do válce sestavu tyčky, sít'ky a obruče. Nejprve kratší konec zasuneme do otvoru pro ložiskový šroub. Sít'ka je teď ve válci, což umožňuje delšímu konci tyčky snadný průchod do osy, ve které jej chceme mít, přes výřez v hlavním válci.



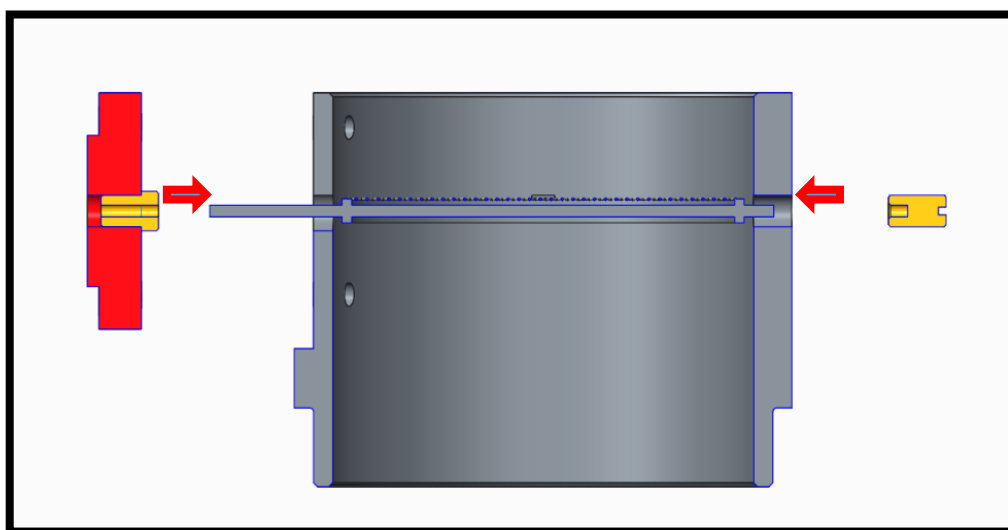
Obrázek 19: Krok 1/1



Obrázek 20: Krok 1/2

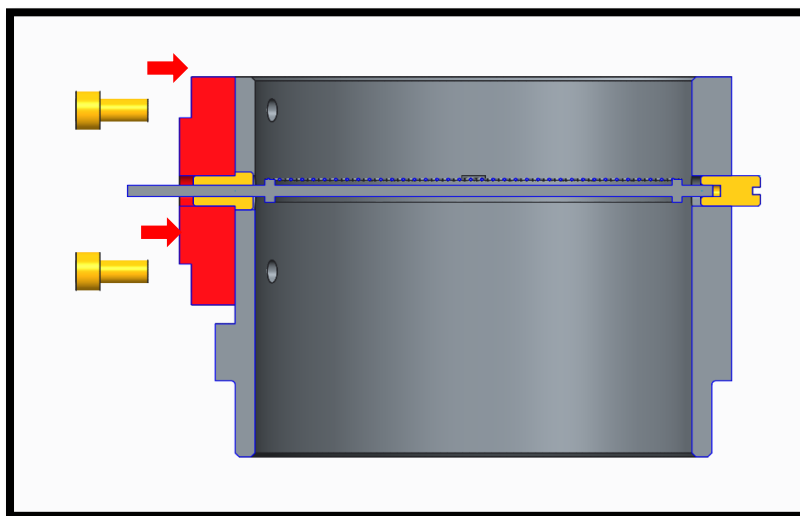
### 4.3 Krok 2 – montáž pouzder

Z levé strany podle obrázku 21 se nasadí příruba s nalisovaným pouzdem. Z pravé strany se zašroubuje ložiskový šroub tak, aby se síťka mohla volně protáčet. Jakékoliv tření by způsobilo velké chyby v měření. Šroub je možno pojistit proti pootočení pojistnou maticí. Před samotnou instalací je důležité kluzné plochy namazat. Jak se ukázalo v průběhu projektu, je také třeba pouzdra i tyčku (v místech uložení) vyleštit velmi jemnou brusnou pastou. Například brusnou pastu na ventily. S ní bylo dosaženo výborného výsledku.



Obrázek 21: Krok 2/1

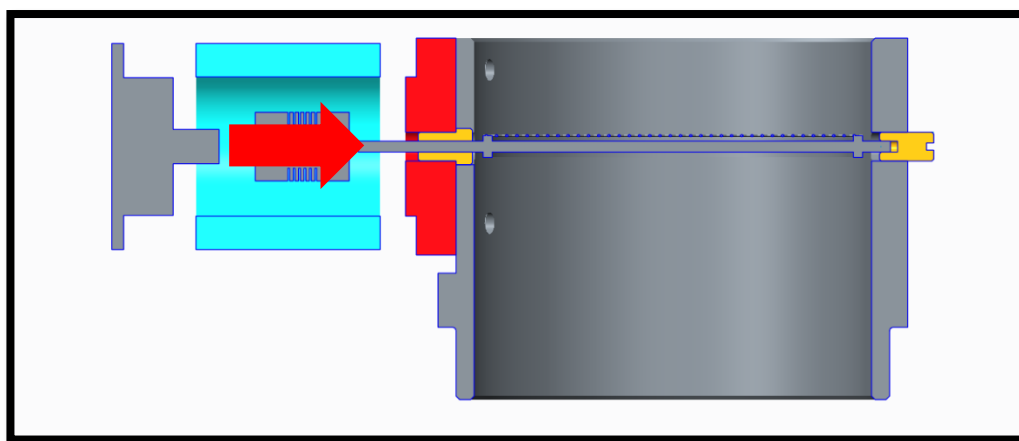
Příruba se následně přichytí 4 šrouby DIN 912 M6x12.



Obrázek 22: Krok 2/2

#### 4.4 Krok 3 – nasazení snímače

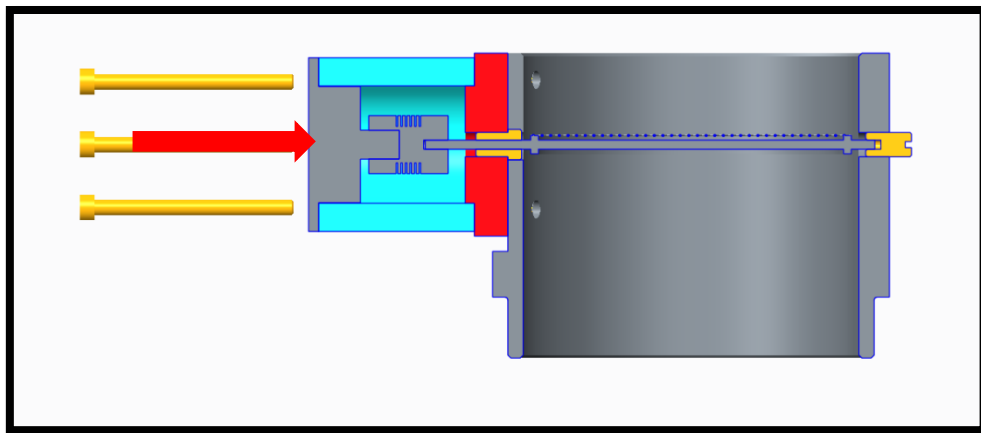
Nejprve připevníme spojku s vlnovcem na snímač momentu. Následně nasuneme vymezovací trubku na centrovací geometrii na přírubě. Opatrně nasadíme spojku na osičku, aby nedošlo k poškození snímače.



Obrázek 23: Krok 3/1



Snímač připevníme šrouby DIN 912 M5x65, šroubovanými do příruby.



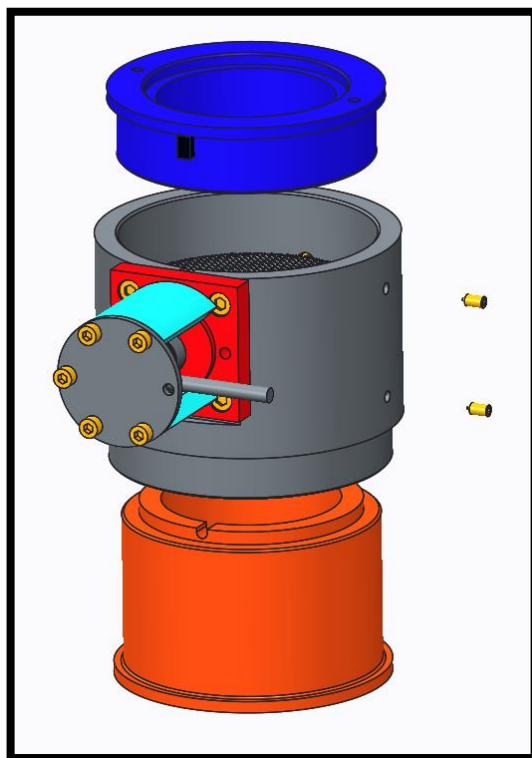
Obrázek 24: Krok 3/2

Zkontrolujeme, že se obruč, na které je síťka, nikde nedotýká vnitřku válce. Případně ji vycentrujeme na střed válce. Pokud je vše v pořádku, dotáhneme šroubek ve spojce.

#### 4.5 Krok 4 – vložení vložek

Následně vložíme vnitřní vložky pro průměr hlavy, kterou chceme měřit. Pro snadnější montáž lze vložky na vnějším průměru namazat. Vnitřní otvor by měl zůstat čistý a hladký, aby neovlivňoval proudění. Spolu s vrchní vložkou vložíme těsnění do drážky, která slouží pro montáž sítě.

Vložené díly pojistíme šroubky nacházejícími se na pravé straně.



Obrázek 25: Krok 4





## **4.6 Krok 5 – montáž osičky**

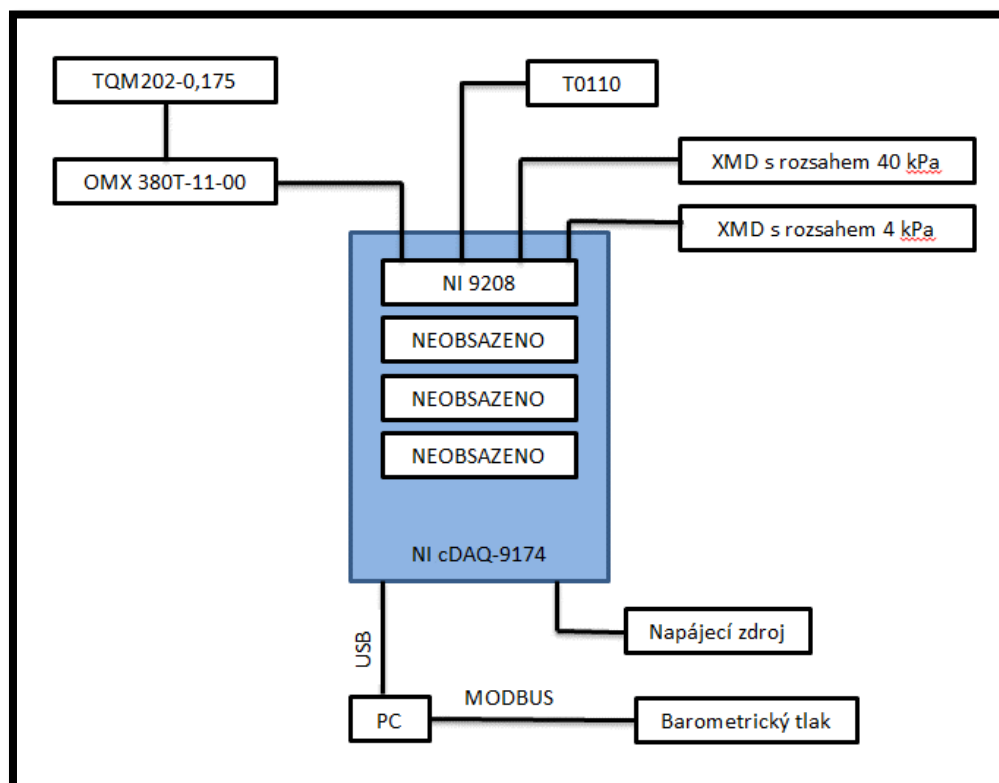
Do vrchní vložky je dobré vyvrtat otvor pro osičku, která je z jedné strany sražená do špičky. Vložená osička definuje polohu, od které otáčíme měřenou hlavou. Pro určení natočení jsou vyznačeny pozice po  $45^\circ$  na přírubě pod hlavou.

## **4.7 Krok 6 – zajištění proti přetížení**

Aby nedošlo k přetížení snímače, lze na sítku nalepit plošky, které při naklopení dosedají na stavěcí šrouby umístěné ve vrchní přírubě. Tyto šrouby se musí po smontování nastavit. Pro správné nastavení se použijí kalibrovaná závaží, pomocí kterých se vyvodí na jedné straně sítiky zatížení odpovídající maximálnímu zatížení snímače, které má hodnotu 0,175 Nm.

## 5 Měřicí aplikace

### 5.1 Zapojení snímačů



Obrázek 26: Schéma zapojení

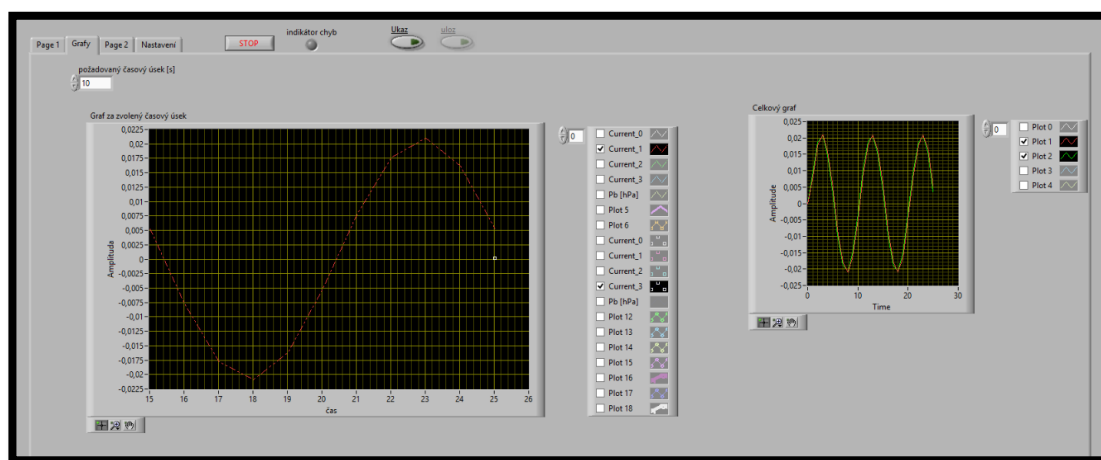
Měřicí aparatura je postavená na základní desce NI cDAQ-9174 od National Instruments. Tato základna je osazena jedním modulem proudových vstupů NI 9208, na který jsou přiváděny signály z dvou tlakových snímačů, jednoho teplotního a ze snímače krouticího momentu TQM202-0,175 od společnosti Omega, který je připojen přes převodník pro tenzometry OMX 380T-11-00 od společnosti Orbit Merret. Hodnoty jsou přiváděny a zpracovávány v Pc, kam je také přiveden přes MODBUS barometrický tlak. V Pc je nainstalované LabView, ve kterém je vytvořená aplikace pro měření.

## 5.2 LabView

LabView je zkratka anglických slov Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. Jedná se o nástroj umožňující automatizovaný záznam dat, jejich zpracování a ukládání. Výrobce tohoto softwaru je National Instruments. První verze vyšla v roce 1986. Od té doby prošla značným vývojem a dnes je dostupná na řadě platform, od Windows přes Linux po macOS.

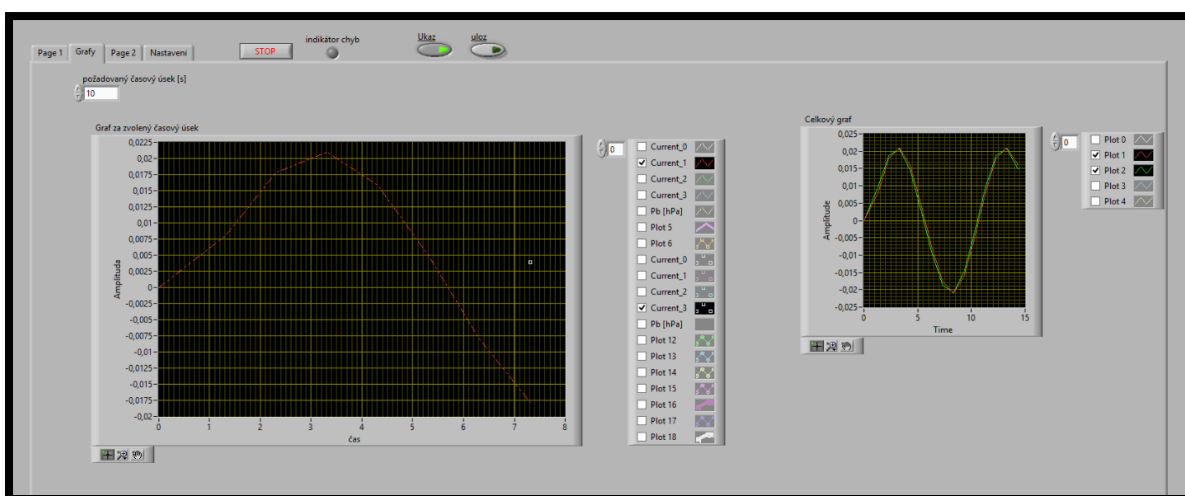
## 5.3 Měřicí aplikace

Vlastní aplikace je uložena na přiloženém médiu. Záznam dat probíhá kontinuálně s frekvencí 100 Hz. Každou sekundu se zaznamenané hodnoty zprůměrují a uloží do souboru, který má název den-měsíc-rok\_hodina-minuta.aut. Jedná se o textový soubor, který lze otevřít na všech zařízeních, bez nutnosti instalace speciálního softwaru. Tento soubor se automaticky vytvoří v adresáři, ve kterém je uložena právě používaná aplikace, při spuštění měření. V souboru \*.aut se vytvoří hlavička obsahující čas a názvy jednotlivých měřených kanálů. Následně se na další řádky ukládají ony více zmíněné zprůměrované hodnoty za 1 sekundu. Jednotlivé hodnoty jsou odděleny tabulátorem.



Obrázek 27: Aplikace

Uživatelské rozhraní aplikace je na obrázku 27. Uživatel si volí počet sekund, za které chce, aby se mu průměrovaly hodnoty. Hodnoty zaznamenané v tomto čase se zobrazují ve větším z grafů společně se zprůměrovanou hodnotou. V grafu lze zobrazit kanály, které nás zajímají, například z hlediska ustálení proudění. Na druhém grafu jsou vykreslovány všechny zaznamenané hodnoty po dobu celého měření, opět s možností zobrazení požadovaných kanálů.



Obrázek 28: Aplikace-ukaž

Pokud se uživateli zdá, že se systém ustálil a chtěl by aktuální stav uložit, může stisknout tlačítko Ukaž, jak je znázorněno na obrázku 28. Po jeho stisknutí se aktuálně zobrazované hodnoty nahrají do smyčky, která hodnoty udržuje v paměti a zobrazuje je do grafu, při současně probíhajícím měření. V tomto okamžiku má uživatel možnost proklikat si všechny kanály. Zkontrolovat, jsou-li všechny hodnoty ustálené, nedošlo-li k ústřelu nějaké hodnoty, a pokud ne, může stiskem tlačítka Ulož, které je hned vedle Ukaž, měření uložit. Následně se vytvoří v pracovním adresáři další soubor s názvem ve tvaru den-měsíc-rok\_hodina-minuta.sha. Do tohoto souboru se uloží hlavička stejná jako je v souboru \*.aut a zároveň se do něj uloží zprůměrované hodnoty na všech kanálech za zvolený časový úsek. Stejně jako \*.aut i tento soubor je obyčejným textovým dokumentem.



Po uložení hodnot se automaticky deaktivuje tlačítko Ukaž a do grafu se načtou aktuální hodnoty. V případě uložení dalších zprůměrovaných hodnot se v souboru \*.sha vytvoří další řádek, na který se tyto hodnoty zapíší.

## 5.4 Kalibrace

Před prvním měřením je nutné zkontrolovat měřicí rozsahy tlakových a teplotního snímače. V LabView ověřit případně přiřadit správný rozsah. Dále je potřeba provést kalibraci převodníku OMX 380, který je použit pro převod napěťového výstupu ze snímače momentu na proud, který je přiveden do modulu od National Instruments. Kalibrace je popsána v návodu od výrobce. Nastaví se rozsah na výstupu 4 až 20 mA. Tomuto rozsahu se poté v LabView přiřadí odpovídající hodnoty krouticího momentu. 4 mA odpovídá -0,175Nm a 20mA odpovídá 0,175Nm.

## 6 Zpracování měření

### 6.1 Teorie k výpočtům

Tok momentu hybnosti přes kruhovou plochu pro tumble lze spočítat jako součet toků momentu hybnosti k osám  $x$  a  $y$ , pokud  $z$  je osa válce. Za předpokladu konstantní hustoty  $\rho$  platí:

$$\dot{B}_x = \rho \int_S y \cdot w^2 dS \quad (6.1)$$

$$\dot{B}_y = -\rho \int_S x \cdot w^2 dS \quad (6.2)$$

$\dot{B}_x$	.....	tok momentu hybnosti k ose $x$
$\dot{B}_y$	.....	tok momentu hybnosti k ose $y$
$S$	.....	plocha v rovině $xy$
$w$	.....	$z$ -ová složka vektoru rychlosti
$x$	.....	souřadnice
$y$	.....	souřadnice
$\rho$	.....	hustota vzduchu

$$\dot{B}_T = \sqrt{\dot{B}_x^2 + \dot{B}_y^2} \quad (6.3)$$

$\dot{B}_T$	.....	tok momentu hybnosti
$\dot{B}_x$	.....	tok momentu hybnosti k ose $x$
$\dot{B}_y$	.....	tok momentu hybnosti k ose $y$

Moment vzniklý na síťce vlivem odporových sil při protékání vzduchu síťkou lze zapsat rovnicemi:

$$M_x = \frac{c_D}{2} \rho \int_S y \cdot w^2 dS \quad (6.4)$$

$$M_y = -\frac{c_D}{2} \rho \int_S x \cdot w^2 dS \quad (6.5)$$

$c_D$	.....	součinitel odporu vzduchu
$M_x$	.....	moment odporových sil k ose $x$
$M_y$	.....	moment odporových sil k ose $y$
$S$	.....	plocha v rovině $xy$

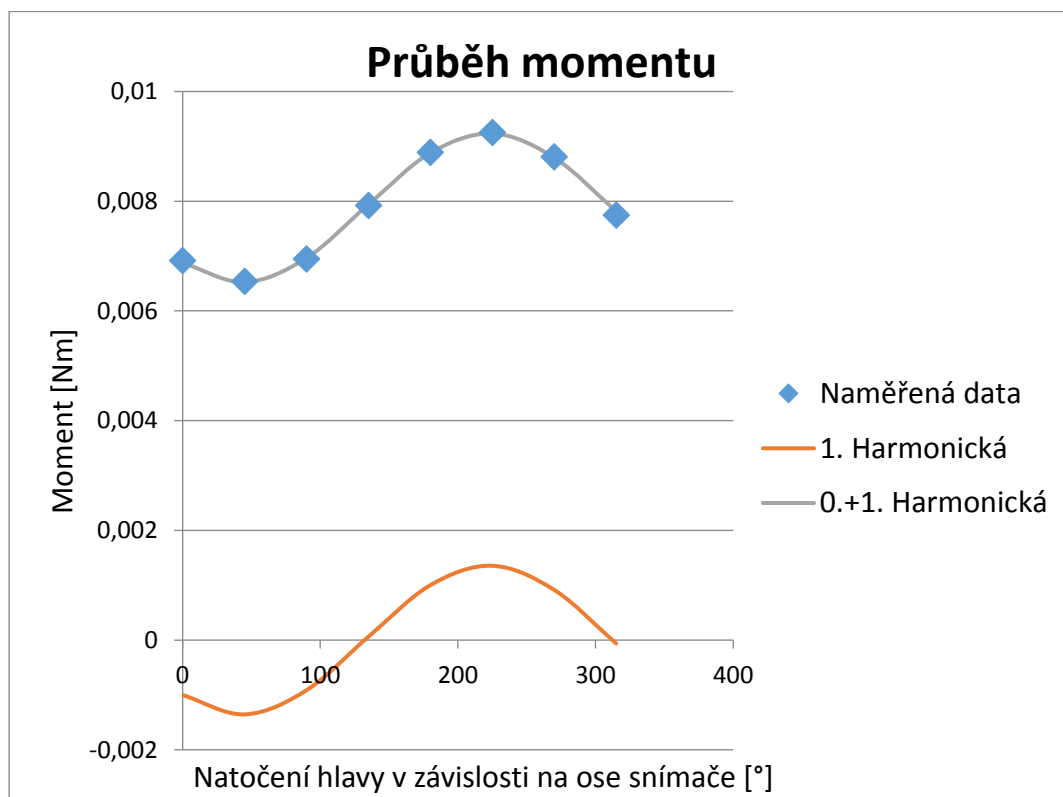
$w$	.....	z-ová složka vektoru rychlosti
$x$	.....	souřadnice
$y$	.....	souřadnice
$\rho$	.....	hustota vzduchu

Z porovnání rovnic (6.1), (6.2), (6.4) a (6.5) lze dojít k závěru, že složky toku momentu hybnosti  $\vec{B}_x$  a  $\vec{B}_y$  jsou úměrné složkám momentu odporových sil  $M_x$  a  $M_y$ . Lze vyjádřit moment hybnosti náplně jako:

$$\vec{B}_T = \frac{2 \cdot M_{amp}}{c_D} \quad (6.6)$$

$\vec{B}_T$	.....	tok momentu hybnosti
$c_D$	.....	součinitel odporu vzduchu
$M_{amp}$	.....	amplituda momentu odporových sil

Vzhledem k předpokladu ustáleného proudění a skutečnosti, že jsme hlavou otáčeli o  $360^\circ$  je průběh točivého momentu harmonický. Obrázek 29 dokazuje správnost našeho předpokladu. Graf byl sestaven z měření hlavy motoru Škoda 1,6 MPI pro zdvih ventilu 1 mm.



Obrázek 29: Průběh momentu

Pro výpočet amplitudy tedy lze využít rozklad na harmonické složky. Protože nás zajímají pouze amplitudy, potřebujeme pouze 1. harmonickou.

$$M_{amp} = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (6.7)$$

$a_k$	.....	složka harmonického rozkladu
$b_k$	.....	složka harmonického rozkladu
$M_{amp}$	.....	amplituda momentu odporových sil

$$a_k = 2 \cdot \sum_{i=0}^l a_{ki} \quad (6.8)$$

$$b_k = 2 \cdot \sum_{i=0}^l b_{ki} \quad (6.9)$$

$a_k$	.....	složka harmonického rozkladu
$b_k$	.....	složka harmonického rozkladu

kde  $l$  je počet měřených pozic. V našem případě bylo provedeno 8 měření po 45°.

$a_{ki}$ ,  $b_{ki}$  jsou složky harmonického rozkladu jednotlivých měření.

$$a_{ki} = M_{ki} \cdot \cos\varphi \quad (6.10)$$

$$b_{ki} = M_{ki} \cdot \sin\varphi \quad (6.11)$$

kde  $M_{ki}$  je snímaná hodnota a  $\varphi$  je relativní natočení hlavy motoru vůči ose snímače momentu.

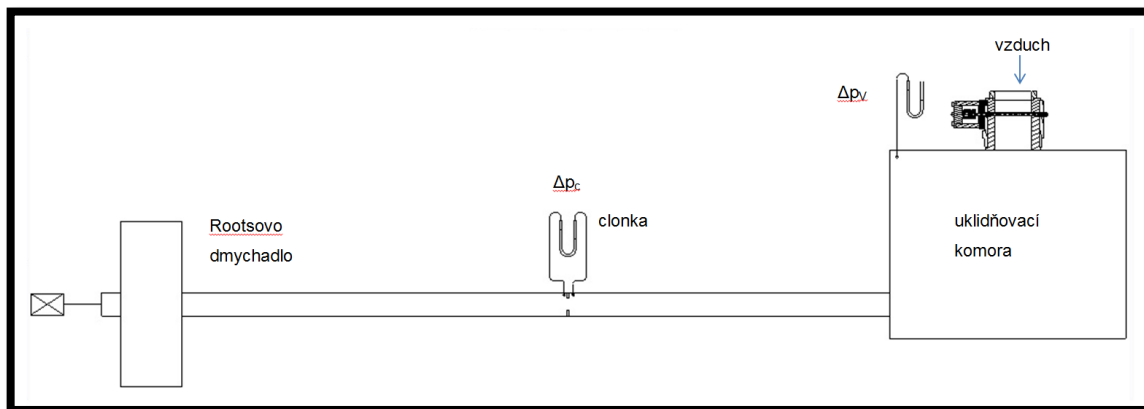
### 6.1.1 Stanovení součinitele odporu

Do rovnice (6.6) potřebujeme určit  $c_D$  což je součinitel odporu (coefficient of drag), který se spočítá z experimentálně stanovené rovnice (6.13) [8].

Měření pro stanovení  $c_D$  probíhalo přímo na zkušebním zařízení znázorněném na obrázku 30. Byla provedena dvě měření. V prvním případě byl



na uklidňovací komoře nasazen válec bez sítky. Při druhém měření se sítkou. V případech obou měření byla upravena vtoková hrana, přimodelována difuzorová část pro snížení vtokové ztráty. Při měřeních byla použita aplikace v LabView zmíněná v kapitole 5.3 *Měřicí aplikace*. Z tlakové ztráty na clonce se spočítala rychlost proudění.



Obrázek 30: Měřící stanoviště pro měření součinitele odporu vzduchu

Rozdíl tlaků  $\Delta p_{V1}$  pro měření bez sítky a  $\Delta p_{V2}$  pro měření se sítkou, při stejném průtoku vzduchu, je hledaná tlaková ztráta. Součinitel odporu bude:

$$c_D = \frac{\Delta p_{V2} - \Delta p_{V1}}{\rho \frac{w^2}{2}} \quad (6.12)$$

$c_D$	.....	součinitel odporu vzduchu
$\Delta p_V$	.....	tlakový spád mezi uklidňovací komorou a okolím
$w$	.....	z-ová složka vektoru rychlosti
$\rho$	.....	hustota vzduchu

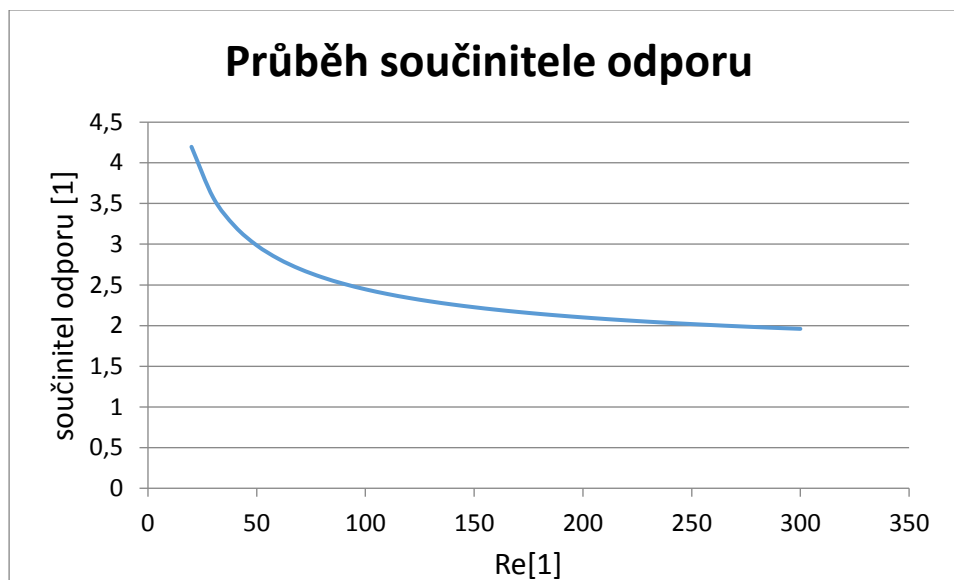
$w$  je v tomto případě jedinou složkou vektoru rychlosti.

Naměřenými hodnotami byla proložena mocninná funkce, jelikož z literatury se ukazuje jako nejvhodnější. Rovnice s nalezenými parametry má tvar (6.13)

$$c_D = 18,8 \cdot Re^{-0,6469} + 1,49 \quad (6.13)$$

$c_D$	.....	součinitel odporu vzduchu
$Re$	.....	Reynoldsovo číslo

Grafické znázornění průběhu součinitele odporu na Reynoldsově čísla na obrázku 31 ukazuje silnou závislost součinitele odporu na Reynoldsově čísla, hlavně pro nízké hodnoty  $Re$ .



Obrázek 31: Součinitel odporu sítiky

Reynoldsovo číslo je vztažené k průměru drátku a vypočítá se podle rovnice (6.14)

$$Re = \frac{c_{pist} \cdot d_s}{\nu} \cdot 10^6 \quad (6.14)$$

$c_{pist}$	.....	pístová rychlost
$d_s$	.....	průměr drátku sítiky
$Re$	.....	Reynoldsovo číslo
$\nu$	.....	kinematická viskozita

Pístovou rychlost  $c_{pist}$  lze spočítat z objemového toku rovnice (6.15). Kinematická viskozita se spočítá jako podíl dynamické viskozity a hustoty, rovnice (6.23).

$$c_{pist} = \frac{q_v}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (6.15)$$

$c_{pist}$	.....	pístová rychlost
$D$	.....	vrtání válce
$q_v$	.....	objemový tok

Kde se objemový tok  $q_V$  spočítá jako podíl hmotnostního toku, určeného podle normy ČSN ISO 5167 a hustoty  $\rho$  spočítané podle rovnice (6.21).

$$q_V = \frac{q_m}{\rho} \quad (6.16)$$

$q_m$	.....	hmotnostní tok
$q_V$	.....	objemový tok
$\rho$	.....	hustota vzduchu

### 6.1.2 Hmotnostní tok podle ČSN ISO 5167

Norma ČSN ISO 5167 definuje výpočet hmotnostního toku clonkou podle následující rovnice:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_c^2 \cdot \sqrt{2 \cdot p_c \cdot \rho} \quad (6.17)$$

$C$	.....	součinitel průtoku
$d_c$	.....	průměr clonky
$p_c$	.....	tlaková ztráta na clonce
$q_m$	.....	hmotnostní tok
$\beta$	.....	poměr průměrů clonkové tratě
$\varepsilon$	.....	součinitel expanze
$\rho$	.....	hustota vzduchu

$C$  jakožto součinitel průtoku clonkou, je dán Reader-Harris/Gallagherovou rovnicí [9], kterou lze pro použité rozměry clonkové tratě zjednodušit na vztah (6.18).

$$C = 0,5961 + 0,0261 \cdot \beta^2 - 0,216 \cdot \beta^8 + 0,00521 \cdot \left( \frac{10^6 \beta}{Re_{D_c}} \right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063 \cdot \left( \frac{19000 \beta}{Re_{D_c}} \right)^{0,8}) \cdot \beta^{3,5} \cdot \left( \frac{10^6}{Re_{D_c}} \right)^{0,3} \quad (6.18)$$

$C$	.....	součinitel průtoku
$Re_{D_c}$	.....	Reynoldsovo číslo vypočteno k $D_c$
$\beta$	.....	poměr průměrů clonkové tratě

Zjednodušení lze uplatnit, jelikož jsou splněny požadavky dané normou. Bod 5.2.3 normy ČSN EN ISO 5167 pro clonku s koutovým odběrem. Vzdálenost mezi osami odběrů a příslušnými stranami clonového kotouče je rovna polovině průměru (odběrné otvory lícují v místě odběru s příslušnou

stranou clonového kotouče). Velikost štěrby pro odběr tlaku má dostatečnou velikost, aby byla zajištěna průchodnost a nedošlo k ucpání.

$$\beta = \frac{d_c}{D_c} \quad (6.19)$$

$\beta$	.....	poměr průměrů clonkové tratě
$d_c$	.....	průměr clonky
$D_c$	.....	průměr potrubí clonkové trati

Pro výpočet součinitele expanze  $\varepsilon$  používá norma ČSN ISO 5167 empirický vzorec (6.20).

$$\varepsilon = 1 - (0,351 + 0,256 \cdot \beta^4 + 0,93 \cdot \beta^8) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right] \quad (6.20)$$

$p_1$	.....	hodnota absolutního tlaku před clonkou
$p_2$	.....	hodnota absolutního tlaku za clonkou
$\beta$	.....	poměr průměrů clonkové tratě
$\varepsilon$	.....	součinitel expanze
$\kappa$	.....	Poissonova konstanta

Dále je potřeba ještě určit hustotu nasávaného vzduchu  $\rho$ .

$$\rho = \frac{p_1}{T_b \cdot r} \quad (6.21)$$

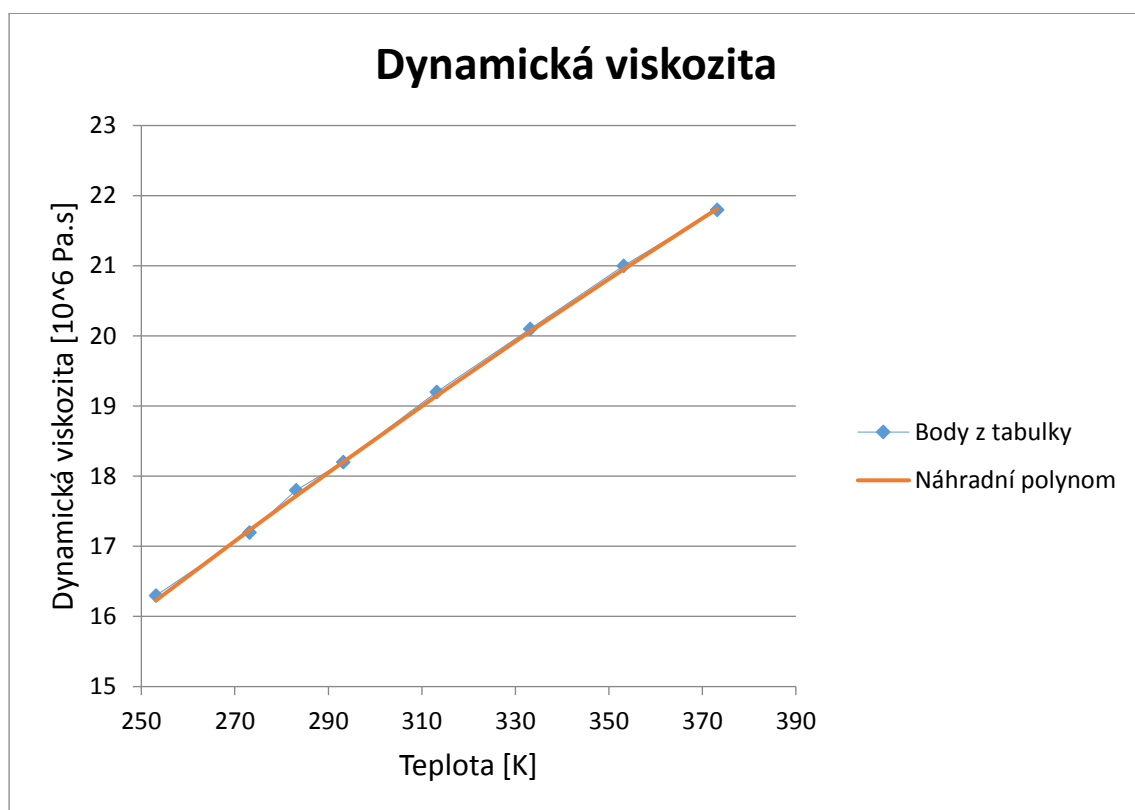
$p_1$	.....	hodnota absolutního tlaku před clonkou
$r$	.....	plynová konstanta
$T_b$	.....	absolutní teplota proudícího vzduchu
$\rho$	.....	hustota vzduchu

### 6.1.3 Kinematická viskozita

Jelikož je viskozita závislá na teplotě je třeba určit polynom, který bude počítat viskozitu z aktuální teploty. Pro tyto účely byly použity hodnoty z tabulky pro suchý vzduch při tlaku 100 kPa z tzb-info [10]. Těmito hodnotami byl proložen polynom ve tvaru (6.22).

$$\eta = -0,00003462 \cdot T_b^2 + 0,0682 \cdot T_b + 1,184 \quad (6.22)$$

$T_b$	.....	absolutní teplota proudícího vzduchu
$\eta$	.....	dynamická viskozita



Obrázek 32: Dynamická viskozita

Z grafu na obrázku 32 je vidět, že náhradní polynom lze použít.

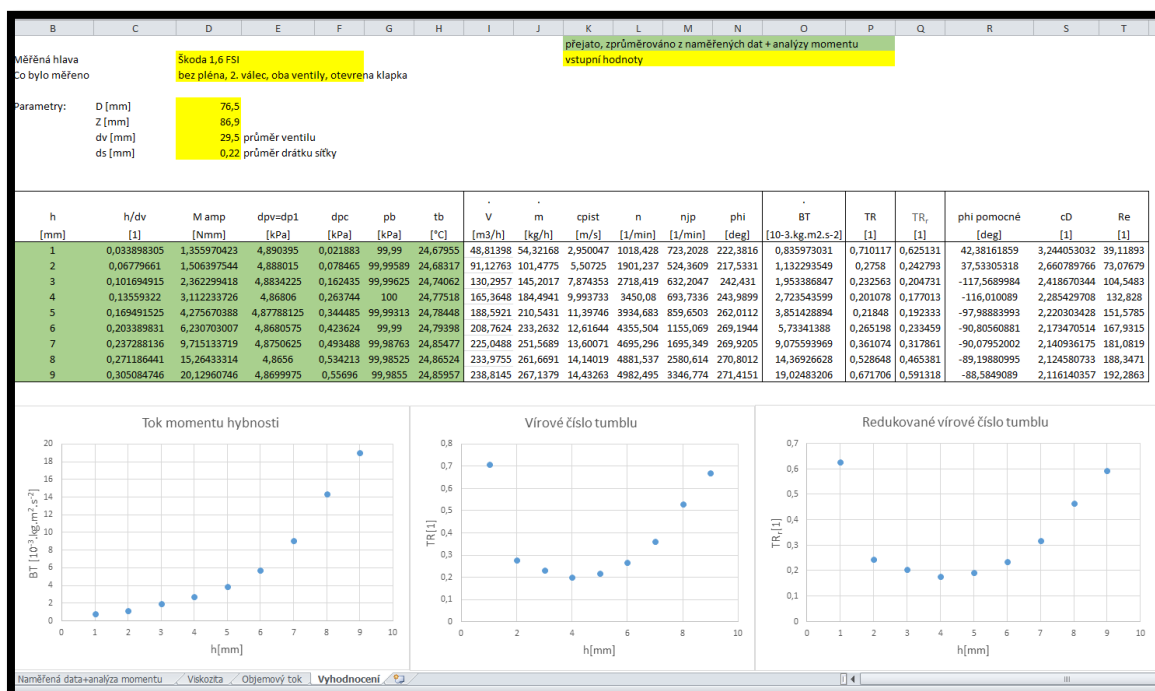
Kinematická viskozita se spočítaná podle rovnice (6.23).

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (6.23)$$

$\rho$	.....	hustota vzduchu
$\eta$	.....	dynamická viskozita
$\nu$	.....	kinematická viskozita

## 6.2 Vyhodnocovací Excel

Pro zpracování zaznamenaných hodnot byl vytvořen dokument v programu Microsoft Excel, který je rovněž přiložen k této práci. Tento Excel má 4 listy: Naměřená data+analýza momentu, Viskozita, Objemový tok a Vyhodnocení.



Obrázek 33: Excel - Vyhodnocení

Uživatel stráví nejvíce času na listu vyhodnocení, ukázaného na obrázku 33. Zde v dolní části vidí grafické znázornění průběhů toku momentu hybnosti, vírového čísla tumblu a redukovaného vírového čísla tumblu, vše v závislosti na zdvihu ventilu. Na tomto listě také uživatel zadává informace o měření a měřené hlavě. Zadává se měřená hlava, jaký sací kanál a jaký ventil byl měřen, jestli je k hlavě přichyceno sací plénium a další informace, které přesně určí, co a za jakých podmínek bylo měřeno. Dále se zadávají parametry zdvih Z a vrtání válce D.

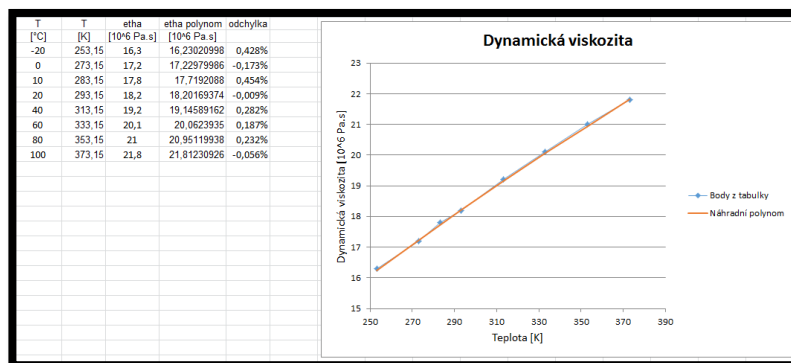


Druhým, pro uživatele velmi důležitým, listem je list Naměřená data+analýza momentu viz obrázek 34. Sem uživatel nakopíruje hodnoty ze souboru \*.sha. Pouze je nutné nahradit tečky, s kterými pracuje LabView čárkami. To se provede pomocí Ctrl+F, v záložce nahradit. Pokud provedl 8 měření po 45° bude mu vše fungovat. Pokud by se stalo, že uživatel zapomene jednu pozici zaznamenat, nebo ji zaznamená dvakrát, zobrazí se mu chybová hláška na kartě Vyhodnocení. Stejná chyba se zobrazí také, pokud uživatel zapomene po změně zdvihu ventilu hodnotu změnit v aplikaci LabView. V tom případě je nutná ruční kontrola, nalezení a opravení chyby.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Čas [s]	DpV	DpC	Tb-degC	Mk	Pb [hPa]	Zdvih [mm]	Úhel [deg]		aki	ak	bki	bk
63,397	4,88788	0,0219	24,69986	0,00692	999,9	1	0		0,00692	-0,00100162	0	-0,00091
81,397	4,89219	0,02191	24,67745	0,00654	999,9	1	45		0,004624		0,004624	
98,397	4,89198	0,0219	24,67693	0,00695	999,9	1	90		4,26E-19		0,00695	
126,397	4,89333	0,02181	24,67685	0,00792	999,9	1	135		-0,0056		0,0056	
148,397	4,89031	0,02192	24,67686	0,00889	999,9	1	180		-0,00889		1,09E-18	
172,397	4,88536	0,02178	24,67683	0,00925	999,9	1	225		-0,00654		-0,00654	
205,397	4,89171	0,02196	24,67675	0,00881	999,9	1	270		-1,6E-18		-0,00881	
240,397	4,8904	0,02188	24,67489	0,00775	999,9	1	315		0,00548		-0,00548	
302,397	4,87391	0,07819	24,67682	0,00675	999,9	2	0		0,00675	-0,00119458	0	-0,00092
371,397	4,89267	0,07859	24,67538	0,00639	999,9	2	45		0,004518		0,004518	
397,397	4,8882	0,07878	24,67574	0,00701	999,9182	2	90		4,29E-19		0,00701	
419,397	4,88799	0,07875	24,67672	0,00811	1000	2	135		-0,00573		0,005735	
450,397	4,8885	0,07842	24,67791	0,00911	1000	2	180		-0,00911		1,12E-18	
488,397	4,8873	0,07809	24,68319	0,00943	1000	2	225		-0,00667		-0,00667	
509,397	4,89024	0,07832	24,6976	0,0088	999,9727	2	270		-1,6E-18		-0,0088	
532,397	4,89531	0,07858	24,70199	0,00773	999,98	2	315		0,005466		-0,00547	
700,397	4,88455	0,16215	24,7192	0,00691	999,9	3	0		0,00691	-0,00109331	0	-0,00209
734,397	4,88159	0,16182	24,72575	0,00563	999,94	3	45		0,003981		0,003981	
758,397	4,88503	0,16305	24,72841	0,00595	999,98	3	90		3,64E-19		0,00595	
780,397	4,88467	0,16262	24,72838	0,00725	999,9	3	135		-0,00513		0,005127	
807,398	4,88183	0,16227	24,73539	0,00907	1000	3	180		-0,00907		1,11E-18	
830,398	4,88565	0,16253	24,74809	0,01024	999,98	3	225		-0,00724		-0,00724	
856,397	4,88232	0,16241	24,76772	0,01002	1000	3	270		-1,8E-18		-0,01002	
895,397	4,88174	0,16263	24,77201	0,00873	1000	3	315		0,006173		-0,00617	
932,397	4,86429	0,26309	24,7606	0,00655	1000	4	0		0,00655	-0,00136481	0	-0,0028
953,398	4,86625	0,26356	24,75905	0,00497	1000	4	45		0,003514		0,003514	
981,397	4,86468	0,26351	24,77996	0,00528	1000	4	90		3,23E-19		0,00528	
1019,397	4,86102	0,26325	24,78	0,00682	1000	4	135		-0,00482		0,004822	
1053,397	4,88367	0,26351	24,77995	0,0094	1000	4	180		-0,0094		1,15E-18	
1099,397	4,86807	0,26422	24,78061	0,01083	1000	4	225		-0,00766		-0,00766	
1124,397	4,86876	0,26464	24,78131	0,01079	1000	4	270		-2E-18		-0,01079	
1152,397	4,86774	0,26417	24,77999	0,00899	1000	4	315		0,006357		-0,00636	
1205,397	4,87134	0,34442	24,77995	0,00736	1000	5	0		0,00736	-0,00059423	0	-0,00423
1225,397	4,87948	0,34401	24,77997	0,00459	999,91	5	45		0,003246		0,003246	
1276,401	4,87473	0,34442	24,77999	0,00389	1000	5	90		2,38E-19		0,00389	
1296,397	4,87478	0,34441	24,78072	0,00541	999,94	5	135		-0,00383		0,003825	
1331,397	4,8758	0,34347	24,78251	0,00845	999,9	5	180		-0,00845		1,04E-18	
1358,398	4,87331	0,34432	24,7812	0,0116	999,9	5	225		-0,0082		-0,0082	
1400,399	4,88276	0,34614	24,78524	0,0122	999,9	5	270		-2,2E-18		-0,0122	
1438,399	4,89085	0,34469	24,80628	0,0106	999,9	5	315		0,007495		-0,0075	

Obrázek 34: Excel - Naměřená data

Na listu Viskozita nemusí uživatel nic měnit, a pokud nechce použít vlastní polynom, prakticky jej nevyužije.



Obrázek 35: Excel - Viskozita

Posledním listem je Objemový tok. Na tomto listu se počítá podle normy ČSN ISO 5167 objemový tok. Dle normy se počítá iteračně, přičemž výsledek ze třetí iterace, který má chybu v řádu  $10^{-6}$ , poté vstupuje do výpočtů na listu Vyhodnocení. Jako v celém souboru i na tomto listu jsou žlutá políčka, která uživatel vyplňuje. Jedná se o parametry clonkové tratě a fyzikální vlastnosti proudícího média.

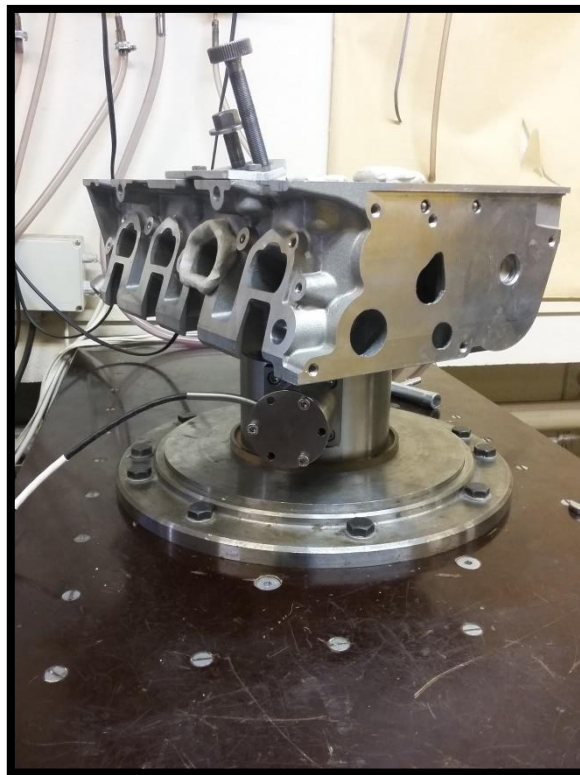
h	M amp	dvp=dp1	dpc	pb	tb	Tb	p1	p2	Pi (p2/p1)	epsilon	rho	eta	ny	A1	X0-ReD	C1	X1	chyba	C2	X2	chyba	C2	X2	chyba	qm	qv
(mm)	(N/mm)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(°C)	(K)	(kPa)	(kPa)			(kg/m³)	(10 <sup>-6</sup> Pa.s)	(10 <sup>-6</sup> m²/s)												(kg/h)	(m³/h)
1	1,35597	4,990395	0,0218825	99,99	24,67955	297,8126	95,12149	95,09961	0,99977	0,999931675	1,11283	18,46263	16,5906993	16498,63	9915,816	0,6316	10419,92	0,048379	0,6307	10405,7	0,001367	0,6307	10406,08	3,7e-05	54,22167296	48,81396
2	1,506198	4,888015	0,078465	99,99589	24,68112	297,8132	95,18634	95,10787	0,999176	0,999755149	1,113575	18,462805	16,5797518	31246,53	18779,44	0,6225	19451,23	0,034537	0,6221	19419,04	0,000627	0,6221	19419,26	1,11e-05	101,477488	91,12763
3	2,362299	4,883423	0,162455	99,99625	24,74062	297,8906	95,27526	95,11283	0,998295	0,999493529	1,114401	18,465532	16,5699195	44955,9	27018,89	0,6189	27822,4	0,02888	0,6186	27810,89	0,000414	0,6186	27811,05	5,8e-06	145,2016536	130,2957
4	3,112234	4,86806	0,26374375	100	24,77518	297,9252	95,39568	95,11194	0,997235	0,999178563	1,11568	18,467173	16,552936	57294,33	34434,39	0,6169	35344,84	0,025759	0,6167	35333,62	0,000318	0,6167	35333,75	3,83e-06	184,4941454	165,3648
5	4,27567	4,877881	0,344485	99,99313	24,78448	297,9345	95,45973	95,11524	0,996391	0,998927683	1,116394	18,467614	16,5422001	65482,5	39355,55	0,6159	40332,59	0,024225	0,6158	40321,49	0,000275	0,6158	40321,61	3,07e-06	210,5431141	188,5921
6	6,236703	4,86803	0,42162375	99,99	24,79398	297,944	95,54557	95,12294	0,995566	0,998682367	1,117362	18,468065	16,5320269	72627,52	45949,77	0,6152	44682,62	0,021115	0,6151	44671,58	0,000247	0,6151	44671,7	2,59e-06	233,2632072	208,7624
7	9,731134	4,879063	0,4934875	99,98763	24,82477	298,0048	95,69005	95,11258	0,994838	0,998465875	1,117842	18,470951	16,5233794	78375,48	47104,35	0,6147	48180,75	0,022341	0,6146	48169,75	0,000228	0,6146	48169,86	2,29e-06	231,5693169	225,0488
8	15,26433	4,8656	0,5342125	99,98525	24,86524	298,0152	95,65386	95,11965	0,994415	0,998340001	1,118361	18,471448	16,5165293	81551,82	49013,36	0,6145	50113,35	0,02195	0,6144	50102,37	0,000219	0,6144	50102,47	2,15e-06	261,6691293	233,9755
9	20,12961	4,869998	0,55096	99,9855	24,89537	298,0096	95,67246	95,1135	0,994178	0,998269594	1,1186	18,471179	16,5127837	83274,25	50048,55	0,6144	51161,21	0,021748	0,6142	51150,23	0,000215	0,6142	51150,34	2,08e-06	267,1378803	238,8145

Obrázek 36: Excel - Objemový tok



## 7 Vyhodnocení měření

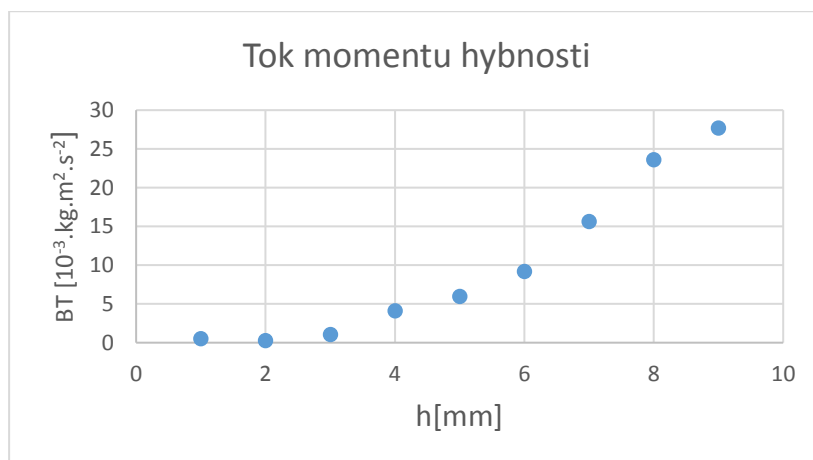
Pro účely ověření funkčnosti a porovnání s předchozím stavem byly provedeny měření na hlavě motoru EA211 a Škoda 1,6 MPI. Byly provedeny měření na hlavě bez sacího pléna, na druhém válci.



### 7.1 EA211 – oba ventily

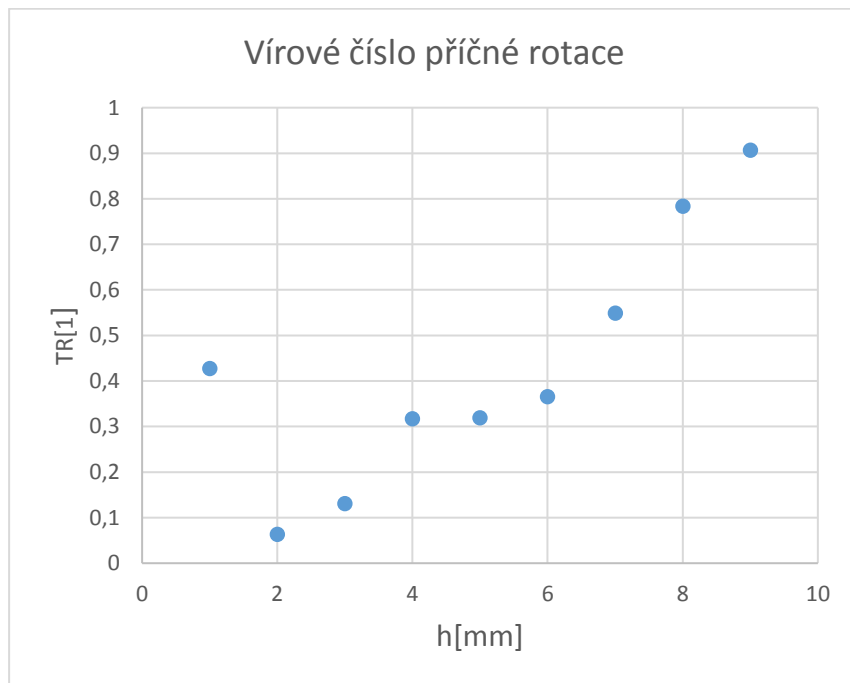
Obrázek 37: EA211

V prvním případě se otevíraly současně oba sací ventily.



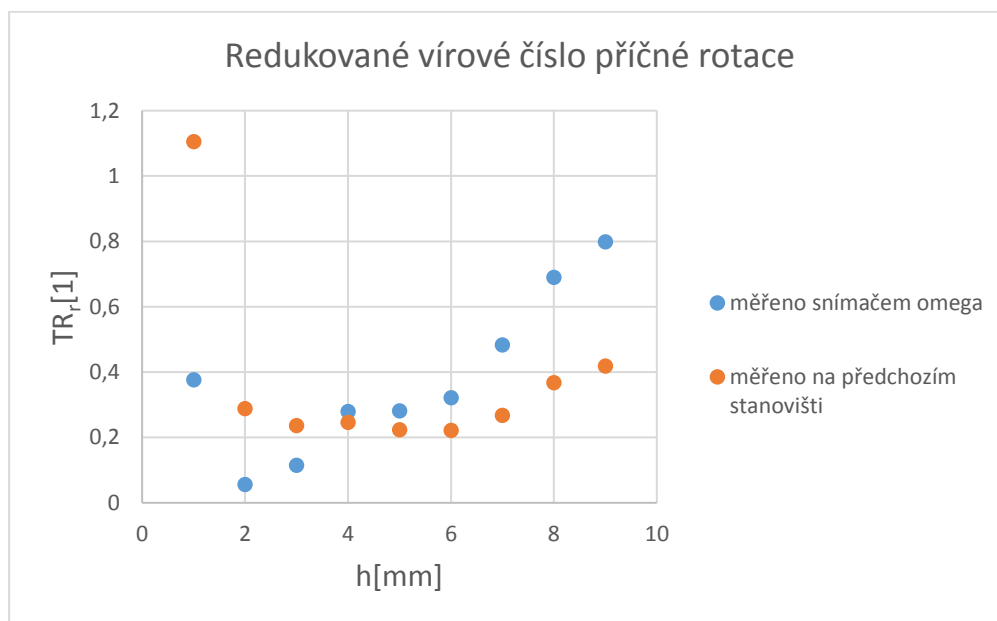
Obrázek 38: Tok momentu hybnosti<sup>1</sup>

Na obrázku 38 je vidět průběh toku momentu hybnosti, který dle očekávání s rostoucím otevřením ventilu narůstá. Výjimkou je zdvih 2 mm.



Obrázek 39: Vírové číslo příčné rotace 1

Na obrázku 39 lze vidět od šestého milimetru nárůst vírového čísla příčné rotace. V důsledku tohoto nárůstu bude směs lépe a hlavně rychleji promísená.



Obrázek 40: Srovnávací graf 1

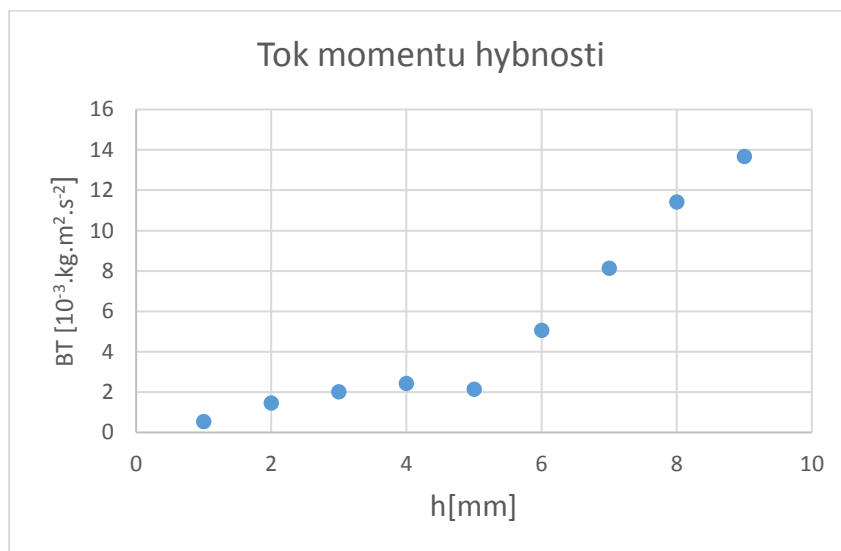
Při pohledu na srovnávací měření na obrázku 40 je vidět kvalitativně podobný průběh pro vyšší hodnoty zdvihu. Rozdíl může být způsoben odlišnou konstrukcí předchozího snímače, kdy mohlo docházet k obtékání sítěky mezi stěnou válce a obručí, k níž byla síťka přichycena. Jiná je také použitá síťka, která má jiný součinitel odporu. Rozdílný je také způsob vyhodnocování hmotnostního toku. Ten by ale tak velké rozdíly nezpůsobil.

Pro malé zdvihy ventilu proudí do válce málo vzduchu. Výsledné Reynoldsovo číslo pro vzduch proudící přes síťku je malé a jak je patrné z grafu na obrázku 31 pro malá Reynoldsova čísla má průběh odporu strmý průběh. Případná nepřesnost ve stanovení koeficientu odporu může přinést značnou chybu. Z toho důvodu mohl vyjít tok momentu hybnosti pro 2 mm nižší než pro jeden, což ovlivnilo výsledné vírové číslo.

Pro plnění motoru jsou důležitější stavy, kdy jsou ventily více otevřené. Do válce se dostává více vzduchu s větším vlivem na výslednou vírovou strukturu.

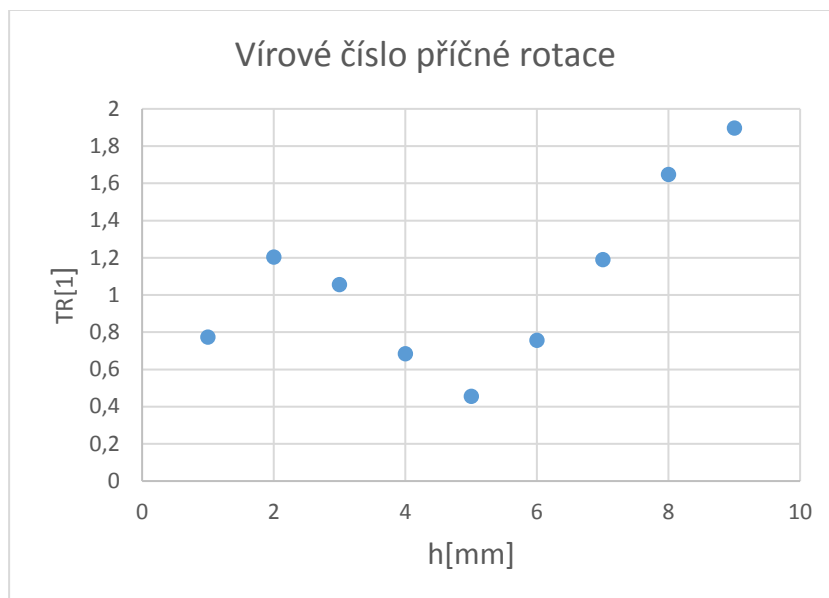
## 7.2 EA211 – pravý ventil

Při tomto měření se otevíral pouze pravý sací ventil.

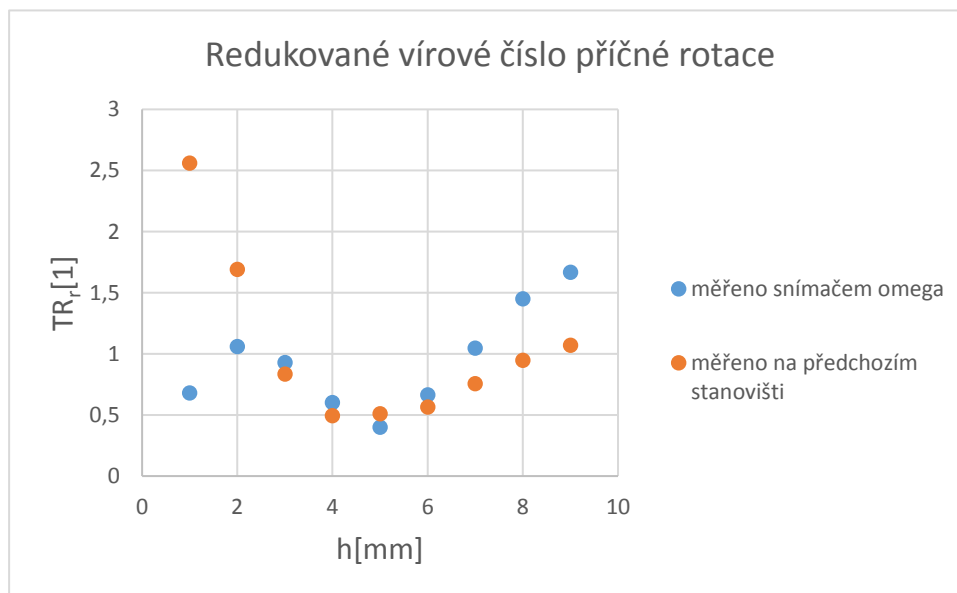


Obrázek 41: Tok momentu hybnosti<sup>2</sup>

Z obrázků 38 a 41 je patrný pokles toku momentu hybnosti, který je pro vyšší otevření ventilu zhruba poloviční v případě otevření pouze pravého ventilu.



Obrázek 42: Vírové číslo příčné rotace2



Obrázek 43: Srovnávací graf2

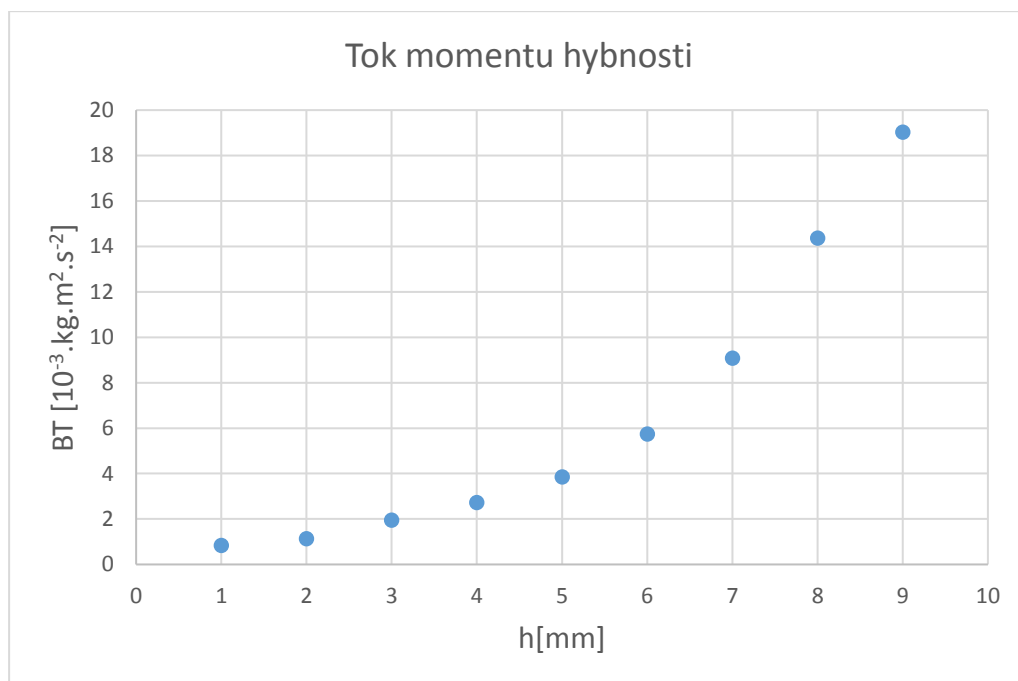
Toto měření opět kvalitativně odpovídá měření na předchozím stanovišti. Kromě zdvihu 1 mm lze rozdílnou konstrukci, jako v předchozím případě. Pro 1 mm může být chyba způsobena nízkým Reynoldsovým číslem.

### 7.3 Škoda 1,6 MPI – oba ventily, otevřená klapka

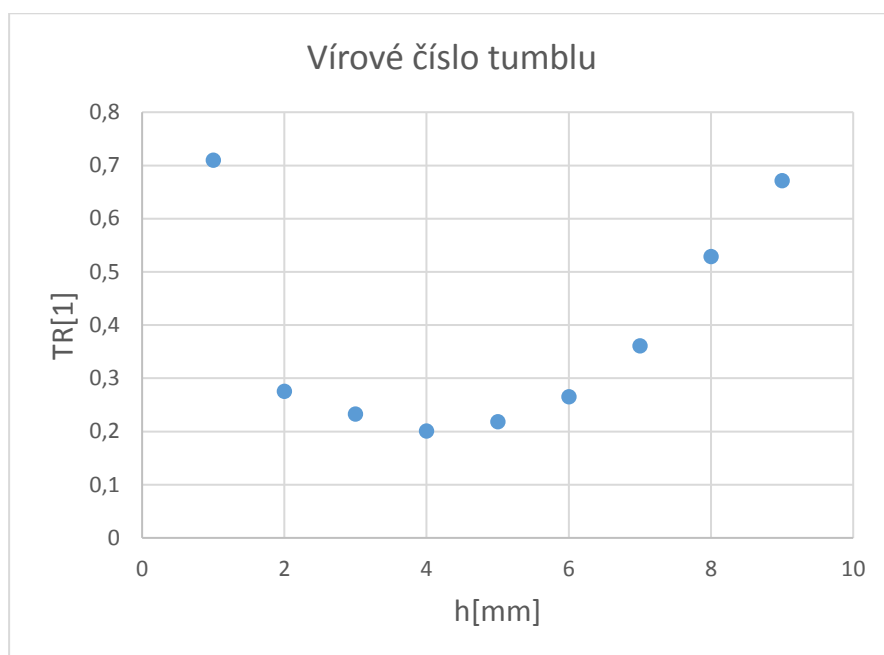
Měření probíhalo na hlavě motoru Škoda 1,6 MPI. Tento motor je vybaven klapkou pro zvýšení úrovně tumblu. První měření probíhalo na 2. sacím kanále, otevíraly se oba ventily současně a klapka byla otevřená. Neměla tedy žádný vliv.



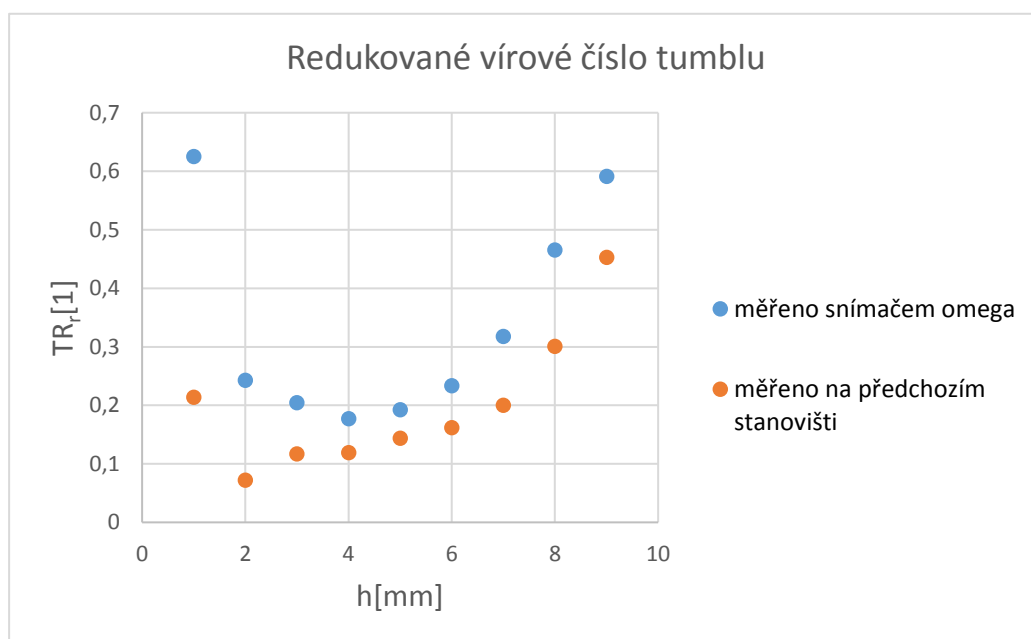
Obrázek 44: Škoda 1,6 MPI



Obrázek 45: Tok momentu hybnosti<sup>3</sup>



Obrázek 46: Vírové číslo příčné rotace3

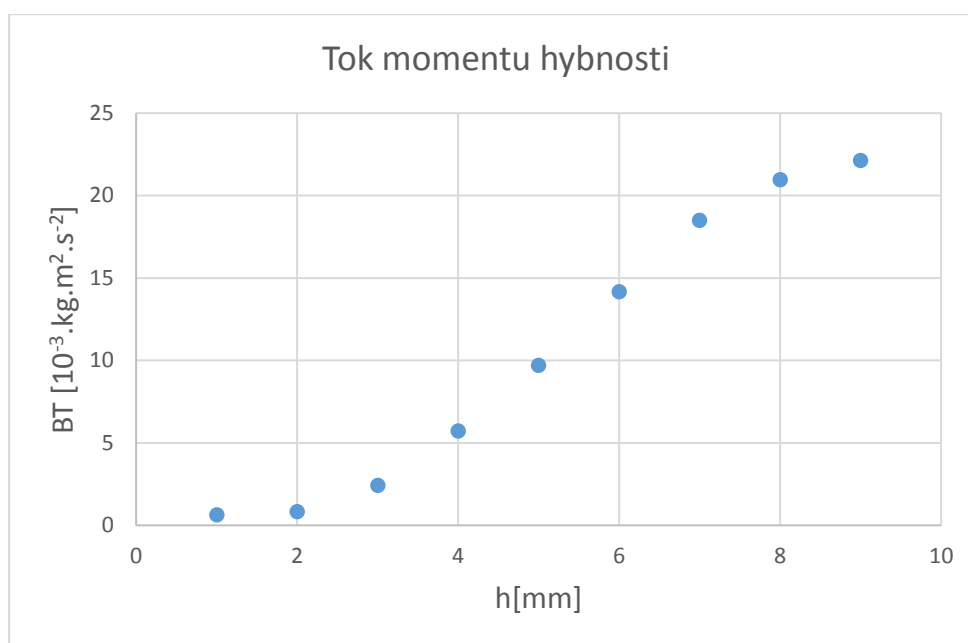


Obrázek 47: Srovnávací graf3

Na obrázku 47 je vidět srovnání s prvním zařízením na měření tumblu v laboratořích ČVUT. Ze srovnání je patrné, že výsledné redukované vírové číslo má kromě polohy 2 mm podobný průběh. Rozdíl bude jako u předchozích měření způsoben možnostmi proudění vzduchu mezi válcem a obručí, případně jinou sítí s jiným součinitelem odporu.

## 7.4 Škoda 1,6 MPI – oba ventily, zavřená klapka

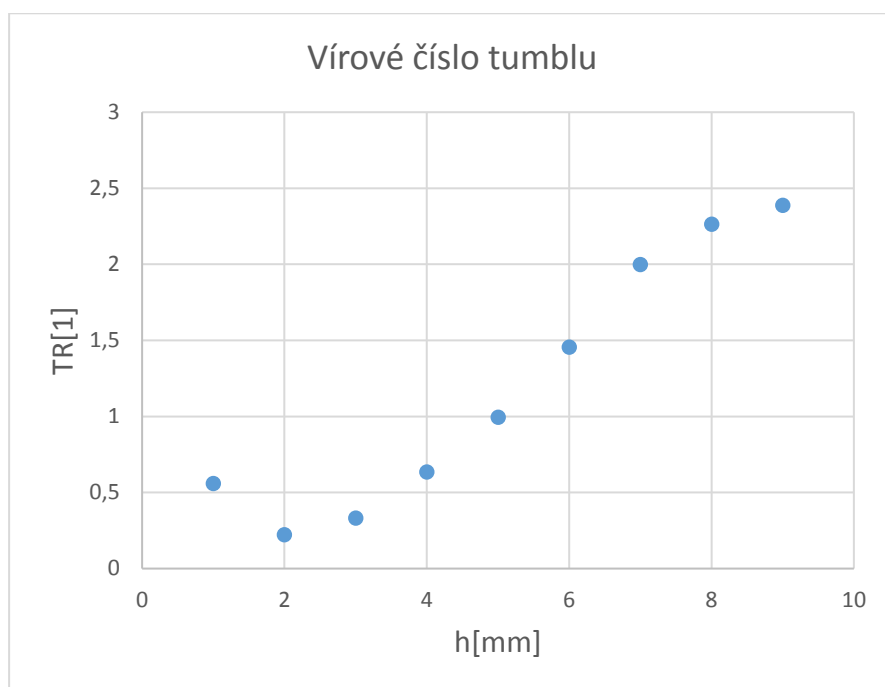
V tomto měření byl měřen stejný kanál, jako v kapitole 7.3. Opět se postupně otevíraly oba ventily současně. Tentokrát byla zavřená klapka pro generování vyšší úrovně tumblu.



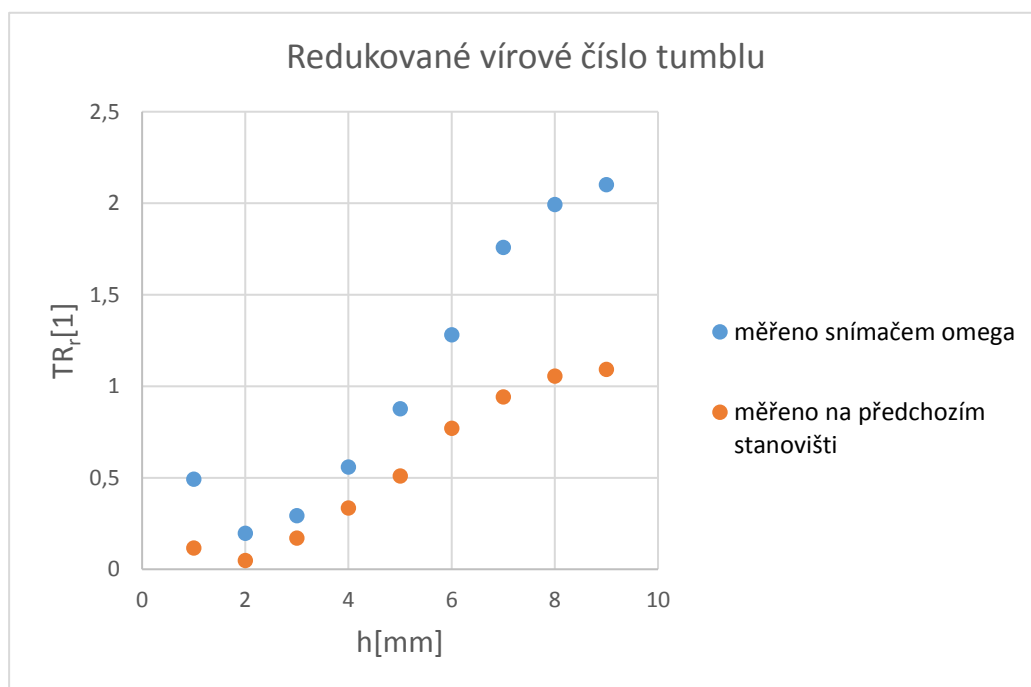
Obrázek 48: Tok momentu hybnosti<sup>4</sup>

Jak vidíme na obrázku 48, dostáváme vyšší hodnoty toku momentu hybnosti s rychlejším nárůstem a patrným trendem k ustalování.

Podobný průběh je patrný i na grafech na obrázcích 49 a 50. Porovnáním s přechodím měřením na obrázcích 45 a 46, vidíme přínos klapky pro tvorbu vyšší úrovně tumblu. U zdvihu 9 mm došlo k nárůstu redukovaného vírového čísla tumblu na více jak trojnásobnou úroveň.



Obrázek 49: Vírové číslo tumblu4

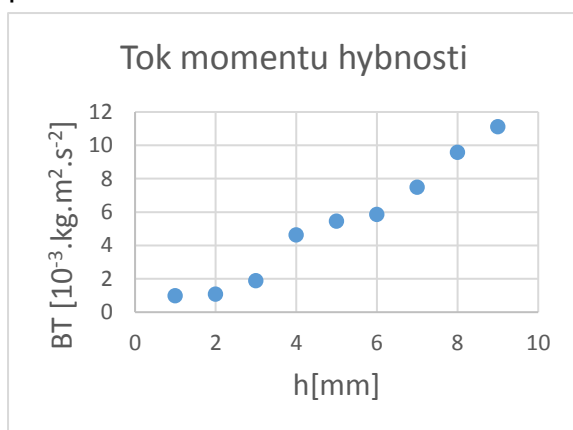


Obrázek 50: Redukované vírové číslo tumblu4

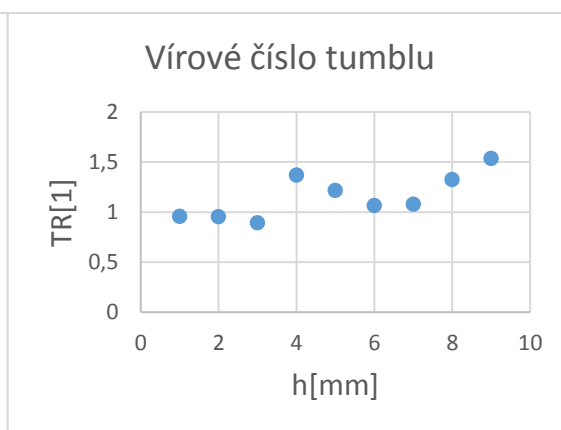


## 7.5 Škoda 1,6 MPI – pravý ventil, otevřená klapka

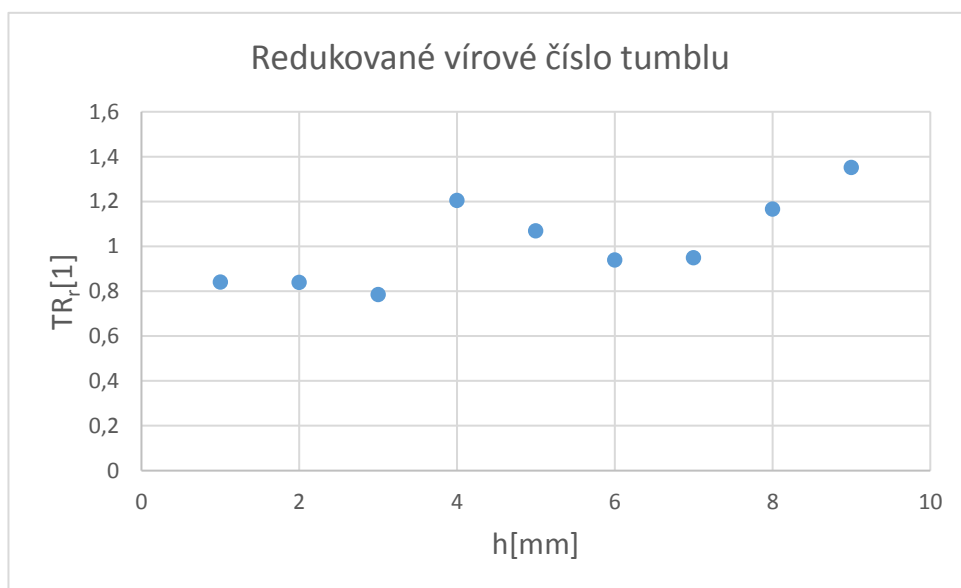
Měřen byl stejný válec jako v předchozích měřeních. Tentokrát byl otevírán pouze pravý sací ventil, klapka otevřená. Průběh toku momentu hybnosti, vírového a redukovaného vírového čísla je znázorněn na obrázcích 51, 52 a 53. Z grafů je patrná skoková změna vírového čísla mezi 3 a 4 mm, která mohla být způsobena přeskokem proudu z jedné stabilní polohy na jinou, jinak vzdálenou od osy válce. K tomuto měření nejsou k dispozici žádná porovnávací data.



Obrázek 51: Tok momentu hybnosti<sup>5</sup>



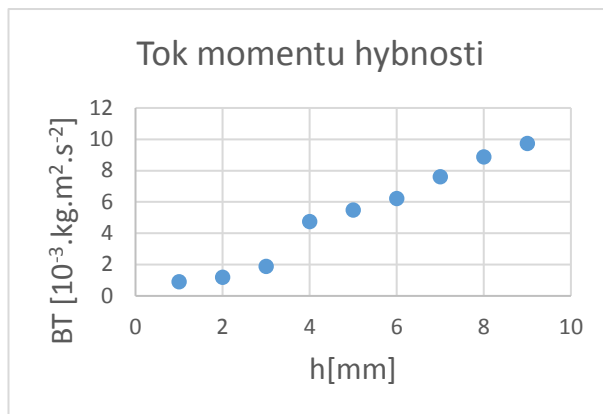
Obrázek 52: Vírové číslo tumblu<sup>5</sup>



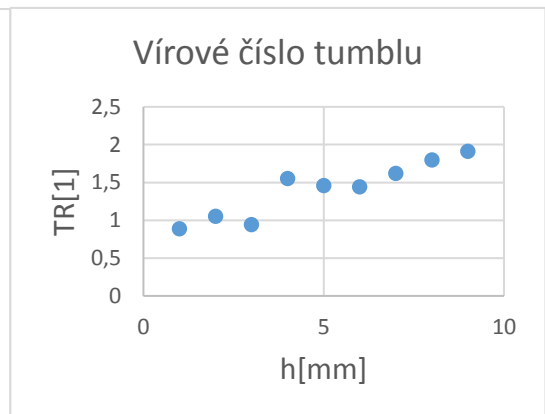
Obrázek 53: Redukované vírové číslo tumblu<sup>5</sup>

## 7.6 Škoda 1,6 MPI – pravý ventil, zavřená klapka

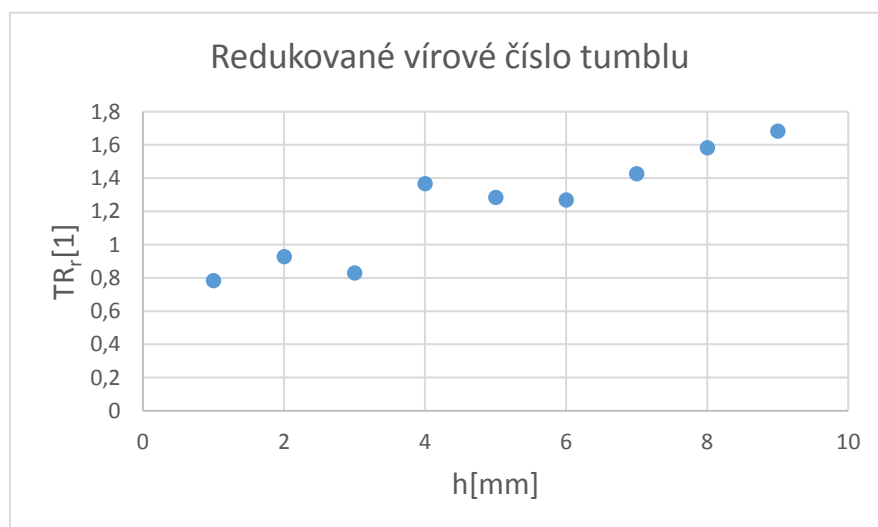
Měření probíhalo za stejných podmínek, na stejném válci, jako v předchozím měření. Tentokrát při zavřené klapce pro generaci vyšší úrovně tumblu. Z porovnání s kapitolou 7.4 je patrné, že klapka v tomto případě nemá tak velký vliv jako při použití s otevřenými oběma ventily. Skoková změna jako v kapitole 7.5 je způsobena přeskokem proudu do jiné trasy.



Obrázek 54: Tok momentu hybnosti<sup>6</sup>



Obrázek 55: Vírové číslo tumblu<sup>6</sup>



Obrázek 56: Redukované vírové číslo tumblu<sup>6</sup>

## 8 Závěr

Tato diplomová práce pojednává o možnostech měření víru s příčnou osou rotace (tumble). Možnosti měření lze rozdělit na přímé metody a na metody integrální. Z obou skupin jsou uvedeny způsoby, které se ve světě používají. Pro integrální metodu založenou na zachytávání účinku proudu na síťce je zpracován 3D model v programu Creo. Pro tento návrh je vytvořena výrobní dokumentace, podle které vznikl měřič, používaný v laboratořích ČVUT v Dejvicích.

V práci je dále popsáno, jaké jsou použity snímače a jak je celá měřicí aparatura sestavena. Záznam hodnot ze snímačů probíhá v aplikaci vytvořené v programu LabView, jejíž obsluha je také popsána.

Naměřená data se zpracovávají v dokumentu vytvořeném v programu Microsoft Excel. V tomto dokumentu jsou naprogramované rovnice. Uživatel jen překopíruje naměřená data a hned vidí výsledky. Rovnicemi za těmito výsledky se práce rovněž zabývá.

Funkčnost zařízení byla demonstrována měřeními na hlavách motorů EA211 a Škoda 1,6 MPI. Výsledky těchto měření ukazují dobré výsledky pro vyšší hodnoty zdvihu ventilu, kde je patrný kvalitativně stejný průběh, jako na předchozím zařízení. Nižší hodnoty dávají mnohdy až neočekávané výsledky. Jednou z příčin by mohlo být lehké tření v uložení tyčky, ze které je snímán moment. Zkrácení kluzné části tohoto pouzdra by mohlo problém vyřešit. Pro výslednou vírovou strukturu jsou důležitější vyšší zdvihy ventilu, při kterých se dostává do válce více vzduchu s větším momentem hybnosti. Rozdíl porovnávaných hodnot redukováného vírového čísla je dán schopností nového snímače zachytit část proudu, která předchozímu snímači protékla mezi obručí a válcem. Nové zařízení přináší zlepšení v možnostech měření tumble. K využití jeho plného potenciálu je potřeba provádět měření s hlavami jiných vrtání.

## 9 Seznam použitých symbolů

$a_k$	[N.m]	složka harmonického rozkladu
$b_k$	[N.m]	složka harmonického rozkladu
$\dot{B}_x$	[kg.m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> ]	tok momentu hybnosti k ose x
$\dot{B}_y$	[kg.m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> ]	tok momentu hybnosti k ose y
$\dot{B}_T$	[kg.m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> ]	tok momentu hybnosti
$C$	[1]	součinitel průtoku
$c_D$	[1]	součinitel odporu vzduchu
$c_{pist}$	[m.s <sup>-1</sup> ]	pístová rychlost
$d_c$	[m]	průměr clonky
$d_s$	[m]	průměr drátku síťky
$D$	[m]	vrtání válce
$D_c$	[m]	průměr potrubí clonkové trati
$i$	[1]	pořadové číslo
$k$	[1]	celkový počet měřených oblastí
$l$	[1]	počet měřených pozic
$n$	[s <sup>-1</sup> ]	otáčky motoru
$n_{jp}$	[s <sup>-1</sup> ]	otáčky fiktivního tuhého tělesa
$M_{amp}$	[N.m]	amplituda momentu odporových sil
$M_k$	[N.m]	měřená hodnota momentu
$M_x$	[N.m]	moment odporových sil k ose x
$M_y$	[N.m]	moment odporových sil k ose y
$p_1$	[Pa]	hodnota absolutního tlaku před clonkou
$p_2$	[Pa]	hodnota absolutního tlaku za clonkou
$p_0$	[Pa]	statický tlak na vstupu
$p_c$	[Pa]	tlaková ztráta na clonce
$\Delta p_V$	[Pa]	tlakový spád mezi uklidňovací komorou a okolím



$q_V$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	objemový tok
$q_m$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	hmotnostní tok
$r$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	plynová konstanta
$Re$	[1]	Reynoldsovo číslo
$Re_{D_c}$	[1]	Reynoldsovo číslo vypočteno k $D_c$
$S$	$[\text{m}^2]$	plocha v rovině xy
$T_b$	[K]	absolutní teplota proudícího vzduchu
$TR$	[1]	vírové číslo tumblu
$TR_r$	[1]	redukované vírové číslo tumblu
$TR_{PIV}$	[1]	vírové číslo tumblu pro metodu PIV
$TR_V$	[1]	vírové číslo tumblu pro metodu s vrtulkou
$u$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	x-ová složka vektoru rychlosti
$v$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	y-ová složka vektoru rychlosti
$w$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	z-ová složka vektoru rychlosti
$x$	[m]	souřadnice
$y$	[m]	souřadnice
$Z$	[m]	zdvih
$\beta$	[1]	poměr průměrů clonkové tratě
$\varepsilon$	[1]	součinitel expanze
$\eta$	$[10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}]$	dynamická viskozita
$\kappa$	[1]	Poissonova konstanta
$\nu$	$[10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	kinematická viskozita
$\nu_{is}$	$[\text{rad} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	izoentropická rychlost
$\rho$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	hustota vzduchu
$\omega$	$[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$	úhlová rychlost klikového hřídele
$\omega_v$	$[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$	úhlová rychlost vrtulky

## 10 Použité zdroje

- [1] Rogers, Dave. Engine Combustion - Spark Ignition (Gasoline). In: *Autoelexblog.blogspot.cz* [online]. 2013 [cit. 2018-01-04]. Dostupné z: <http://autoelexblog.blogspot.cz/2013/10/technology-focus-engine-combustion.html>
- [2] NISSAN MOTOR CORPORATION. Clean Diesel Technology: Newly developed Diesel Engine M9R. In: *Https://www.nissan-global.com* [online]. [cit. 2018-01-04]. Dostupné z: <https://www.nissan-global.com/en/technology/overview/m9r.html>
- [3] Murali Krishna, B., Mallikarjuna, J. M. JAFM - Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 4, No. 1, pp. 1-14, 2011. Dostupné z: [www.jafmonline.net](http://www.jafmonline.net), ISSN 1735-364
- [4] Petschenig, E., GLANZ, R., a SORGER, H. Differential flow field analysis in engine development. MTZ - Motortechnische Zeitschrift [online]. 2010, (5), 26-32 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: <https://www.springerprofessional.de/mtz-motortechnische-zeitschrift-5-2010/4985952>
- [5] Masi, M., Artico, L., and Gobbato, P., Measurements of the Intake and In-Cylinder Flow Field to Investigate the Reliability of CFD Steady-State Simulations for Actual Engines, v SAE Technical Paper 2015-24-2404, 2015, doi:10.4271/2015-242404.
- [6] Baer, P. H. 3 Load Cell Tumble Meter Development. SAE technical paper series [online]. 2008. [cit. 2018-01-05]. ISSN 0148-7191. Dostupné z: [www.sae.org](http://www.sae.org)
- [7] Rootsovo dmychadlo. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Rootsovo\\_dmychadlo](https://cs.wikipedia.org/wiki/Rootsovo_dmychadlo)



[8] Hatschbach P., Schmidt J.: Measurement with improved Tumble Meter, In: KOKA 2017 - XLVIII. mezinárodní vědecká konference českých a slovenských univerzit a institucí zabývajících se výzkumem motorových vozidel a spalovacích motorů, Hradiště nad Jizerou, 2017-09-11/2017-09-12. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2017. ISBN 978-80-7494-354-6, p.125-130

[9] Teysslerová, M., Krchňáková. V. ČSN EN ISO 5167-2. *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu Část 2: Clony*. 2003.

[10] Fyzikální hodnoty pro suchý vzduch při tlaku 100 kPa. *Tzb-info* [online]. [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/38-fyzikalni-hodnoty-pro-suchy-vzduch-pri-tlaku-100-kpa>

## 11 Seznam obrázků

Obrázek 1: Tumble [1]	- 7 -
Obrázek 2: Swirl [2]	- 8 -
Obrázek 3: Nastavení válce plexisklem [3]	- 12 -
Obrázek 4: Schéma měření pro PIV metodu [3]	- 12 -
Obrázek 5: Rychlostní pole [3]	- 13 -
Obrázek 6: PIV - AVL - měřící zařízení [4]	- 14 -
Obrázek 7: PIV – AVL - princip měření [4]	- 15 -
Obrázek 8: Vrtulka [5]	- 16 -
Obrázek 9: 3 silové snímače [6]	- 17 -
Obrázek 10: Převod na swirl [6]	- 18 -
Obrázek 11: OMPR - Hatschbach	- 19 -
Obrázek 12: schéma měřícího stanoviště	- 20 -
Obrázek 13: Rootsovo dmychadlo [7]	- 21 -
Obrázek 14: 3D model měřícího stanoviště	- 22 -
Obrázek 15: Odporové těleso	- 23 -
Obrázek 16: Řez osou snímače	- 24 -
Obrázek 17: hlavní válec	- 25 -
Obrázek 18: hlavní válec 2	- 26 -
Obrázek 19: Krok 1/1	- 26 -
Přípravek pro měření tumble ve válci spalovacího motoru	- 61 -





---

Obrázek 20: Krok 1/2	- 27 -
Obrázek 21: Krok 2/1	- 27 -
Obrázek 22: Krok 2/2	- 28 -
Obrázek 23: Krok 3/1	- 28 -
Obrázek 24: Krok 3/2	- 29 -
Obrázek 25: Krok 4	- 29 -
Obrázek 26: Schéma zapojení	- 31 -
Obrázek 27: Aplikace	- 32 -
Obrázek 28: Aplikace-ukaž	- 33 -
Obrázek 29: Průběh momentu	- 36 -
Obrázek 30: Měřící stanoviště pro měření součinitele odporu vzduchu	- 38 -
Obrázek 31: Součinitel odporu sítě	- 39 -
Obrázek 32: Dynamická viskozita	- 42 -
Obrázek 33: Excel - Vyhodnocení	- 43 -
Obrázek 34: Excel - Naměřená data	- 44 -
Obrázek 35: Excel - Viskozita	- 45 -
Obrázek 36: Excel - Objemový tok	- 45 -
Obrázek 37: EA211	- 46 -
Obrázek 38: Tok momentu hybnosti	- 46 -
Obrázek 39: Vírové číslo příčné rotace	- 47 -
Obrázek 40: Srovnávací graf	- 47 -

---

Přípravek pro měření tumblu ve válci spalovacího motoru	- 62 -
---	--------



Obrázek 41: Tok momentu hybnosti <sup>2</sup>	- 48 -
Obrázek 42: Vírové číslo příčné rotace <sup>2</sup>	- 49 -
Obrázek 43: Srovnávací graf <sup>2</sup>	- 49 -
Obrázek 44: Škoda 1,6 MPI	- 50 -
Obrázek 45: Tok momentu hybnosti <sup>3</sup>	- 50 -
Obrázek 46: Vírové číslo příčné rotace <sup>3</sup>	- 51 -
Obrázek 47: Srovnávací graf <sup>3</sup>	- 51 -
Obrázek 48: Tok momentu hybnosti <sup>4</sup>	- 52 -
Obrázek 49: Vírové číslo tumblu <sup>4</sup>	- 53 -
Obrázek 50: Redukované vírové číslo tumblu <sup>4</sup>	- 53 -
Obrázek 52: Vírové číslo tumblu <sup>5</sup>	- 54 -
Obrázek 53: Redukované vírové číslo tumblu <sup>5</sup>	- 54 -
Obrázek 55: Vírové číslo tumblu <sup>6</sup>	- 55 -
Obrázek 56: Redukované vírové číslo tumblu <sup>6</sup>	- 55 -



## 12 Přílohy

Příloha 1: Výkresy

Příloha 2: 3D model

Příloha 3: Aplikace pro měření v LabView

Příloha 4: Dokument pro vyhodnocení měření v MS Excel